Anno LX
Numero 1
Aprile 2011

Elettronica e telecomunicazioni

Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica

Editoriale

Servizi Audio MPEG Surround su Radio Digitale

3D - Virtual Microphone System Sonda Microfonica ad Elevata Direttività

L'acustica architettonica - Parte III Allestimento interno degli ambienti

Elettronica e telecomunicazioni

LA RIVISTA È DISPONIBILE SU WEB
ALLA URL WWW.CRIT.RAI.IT/ELETEL.HTM

Anno LX
N°1
Aprile 2011

Rivista quadrimestrale a cura della Rai

Indice

Editoriale

Gianfranco **Barbieri**
Direttore di
"Elettronica e Telecomunicazioni"

Il mondo della radiodiffusione digitale è caratterizzato da un persistente dinamismo. Esso richiede flessibilità per adattarsi alle istanze sollevate dal sempre più rapido sviluppo delle tecnologie, da una migliore efficienza spettrale, la comparsa di nuove applicazioni e servizi.

La radiofonia è oggi al centro di questa evoluzione, con l'espandersi della famiglia di standard basati sulla normativa Eureka 147, in cui sono compresi l'originario DAB (*Digital Audio Broadcasting*) ed il DAB+, per la radiofonia digitale, e il DMB (*Digital Media Broadcasting*) per la radio e la TV mobile; il World DMB Forum ha il compito di sovrintendere allo sviluppo dei suddetti standard, offrire assistenza nelle procedure di normalizzazione nelle varie aree del mondo e promuovere lo sviluppo industriale delle tecnologie DAB, DAB+ e DMB.

In base ai dati forniti dal World DMB Forum (www.worlddab.org) attualmente più di 500 milioni di utenti a livello mondiale sono in grado di ricevere circa 1300 servizi DAB/DAB+/DMB. Ricevitori commerciali DAB sono stati in alcuni paesi immessi sul mercato fin dal 1998; attualmente sono commercialmente disponibili più di 300 differenti modelli.

Una citazione particolare merita lo standard DAB+ Quando il DAB venne sviluppato alla fine degli anni '80 esso venne basato sulla codifica MPEG Audio Layer II, che a quei tempi rappresentava lo stato dell'arte; venne in seguito sviluppato il MPEG Audio Layer III (universalmente noto come MP3) che conquistò rapidamente il mercato della musica digitale. In tempi più recenti anche il mitico MP3 è stato superato in efficienza e livello di prestazioni da MPEG 4 – AAC e ciò ha fatto sorgere l'esigenza di un aggiornamento della norma di codifica audio per il DAB allo scopo di ottenere maggior efficienza e ulteriore riduzione del bit-rate; il DAB+, standardizzato nel febbraio 2007 dall'ETSI (l'istituto europeo per la standardizzazione), prenderà il posto del DAB e, grazie all'adozione dell'"algoritmo di compressione HE – AAC (*High Efficiency Advanced Audio Codec*) consentirà, a parità di qualità e di robustezza del segnale, di raddoppiare o addirittura triplicare il

numero dei programmi trasmessi in un singolo bouquet, consentendo eventualmente l'inserimento di altri servizi radiofonici.

Un'altra importante innovazione consiste nell'aggiunta di potenzialità video multimediali al DAB rendendo quest'ultimo una piattaforma multimediale digitale sia radiofonica che televisiva mobile. DMB è il nuovo sistema di trasmissione per la radiofonia digitale basato sul DAB che consente di veicolare contenuti multimediali (audio, video e dati) ed, in particolare, anche immagini associate ai contenuti audio trasmessi da una emittente radiofonica.

I segnali DAB/DAB+ e DMB VR possono coesistere all'interno del medesimo multiplex e possono essere ricevuti da radioricevitori adatti a decodificare gli standard.

Il risveglio di interesse da parte dei media per l'innovazione tecnologica nel comparto della radiofonia ci ha suggerito di dedicare questo numero della Rivista ad argomenti tecnicamente collegati con l'evoluzione del DAB che, per essere sfruttato al meglio, richiede nuove strategie per la generazione di programmi.

Uno dei punti chiave nell'evoluzione della diffusione radiofonica è costituito dal suono multicanale: dopo anni di radio FM stereo, gli utenti potranno ascoltare programmi Surround 5.1 di qualita digitale.

Parallelamente al miglioramento della qualità soggettiva percepita dall'utente si procede all'affinamento delle tecniche di ripresa: due articoli trattano le problematiche della registrazione multicanale e dell'acustica architettonica.

In particolare, il secondo articolo descrive la teoria su cui si basa il nuovo sistema di ripresa e registrazione multicanale basato su 32 capsule posizionate su una sonda sferica e alcune applicazioni pratiche. Con questo sistema si possono sintetizzare in tempo reale fino a 7 microfoni virtuali potendo scegliere dinamicamente la loro direttività.

La diffusione di Servizi Audio MPEG Surround su Radio Digitale

Paolo **Casagranda**,
Leonardo **Scopece,**
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

1. Introduzione

Lo standard DAB+/DMB si sta affermando in tutta Europa consentendo trasmissioni radiofoniche più efficienti e affidabili accanto a nuovi servizi basati su testo, immagini e dati. Uno dei punti chiave nell'evoluzione della diffusione radiofonica è il suono multicanale: dopo anni di radio FM stereo, gli utenti potranno ascoltare programmi Surround 5.1 di qualità digitale.

Il presente articolo si propone di fornire una breve introduzione alla tecnologia audio multicanale, con particolare riferimento alla sua attuazione su Radio Digitale DAB+. Conclude l'articolo una descrizione dei test di compatibilità con i ricevitori attualmente disponibili e una valutazione degli impatti sull'MPEG Surround sulla normativa per i ricevitori radio digitali europei.

Sommario
L'articolo affronta la tematica dell'audio multicanale sulla radio digitale. Viene brevemente descritta la tecnologia audio multicanale, con particolare riferimento alla sua attuazione su Radio Digitale DAB+. Sono inoltre riportati i risultati dei test di compatibilità con i ricevitori attualmente disponibili, nonché considerazioni sulla attuale normativa europea.

2. Audio Multicanale

Per un periodo abbastanza lungo il mondo dell'audio professionale non ha avuto sviluppi considerevoli, al contrario del video.

L'immagine è sempre stata percepita come più ricca di informazioni ed emozioni, mentre il suono è stato da molti considerato subordinato prescindendo dalla sua qualità.

Ma i prodotti radiofonici, con i loro effetti, le loro "ambientazioni", con i toni particolari dei dialoghi riescono a dare molte e forti emozioni, sicuramente più efficaci dell'immagine in parecchie circostanze. E' facile ricordare, ad esempio, le commedie radiofoniche, che ricche di effetti di ambiente, sulle voci degli attori, di simulazioni di immagini sonore non necessariamente presenti nel momento della registrazione e/o messa in onda, fanno sì che lo spettatore "viva" in prima persona la realtà che ascolta per radio.

Finora tutto ciò è stato possibile producendo un segnale audio stereofonico. Dopo tanti anni, però, le tecniche e le tecnologie audio hanno avuto una spinta in avanti. Dalle tecniche di ripresa multimicrofonica (che ancora oggi si utilizza soprattutto in ambiente televisivo), alle tecniche stereo con microfoni stereo, si è arrivati alle tecniche multicanale che utilizzano sistemi microfonici multipli per ottenere più segnali audio.

E' ormai una realtà la possibilità di creare un suono multicanale o, come si usa genericamente nominare, un suono surround, questo per far sì che l'ascoltatore si senta sempre più immerso e partecipe nel mondo che sente: dall'ascolto di un concerto, ad uno sceneggiato radiofonico.

Nuove tecniche si affacciano sullo scenario tecnologico che permettono queste realizzazioni, e tra queste ricordiamo quella basata sul sistema 3D VMS con origine dalla teoria Ambisonic. Il sistema è stato brevettato dalla Rai Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica e l'A.I.D.A., spin-off dell'Università di Parma [1,2].

Acronimi e sigle	
3D-VMS	3D - Virtual Microphone System
AAC+	Advanced Audio Coding (MPEG)
AC3	algoritmo di compressione (Dolby Digital)
AIDA	Advanced Industrial Design in Acoustic
AES	Audio Engineering Society
ARD	Associazione Radio Digitale
BIFS	Binary Format for Scenes (MPEG-4)
DAB	Digital Audio Broadcasting
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DTS	Digital Theater System
EBU	European Broadcasting Union
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FM	Frequency Modulation
MPEG	Movig Picture Experts Group (ISO/IEC JTC 1/SC 29/WG 11)
SAC	Spatial Audio Coding (MPEG ISO/IEC 23003-1)
UDP	User Data Protocol
X-PAD	eXtended Program Associated Data

Il sistema 3D-VMS utilizza una sonda sferica di circa 8,5 cm di diametro, sulla cui superficie si trovano 32 capsule; questa è collegata con un cavo ethernet che può essere lungo fino a 140 m, ad un'interfaccia audio e ad un sistema di analisi e sintesi digitale frutto del brevetto. Dai 32 segnali "grezzi" ottenuti in ripresa, si possono sintetizzare fino a 7 microfoni virtuali per la ripresa in real time e multipli di 7 in post-produzione, che possono essere disposti sulla scena in tutto lo spazio (360° sul piano e 180° in altezza) con una direttività che può andare dall'omnidirezionale al direttivo più spinto detto di ordine 6. Un insieme di 7 segnali così ottenuti può poi essere "mappato" in surround o in qualunque altro modo attraverso un mixer o tramite l'interfaccia progettata per il sistema.

Si può quindi ottenere un segnale surround, che codificato opportunamente, può essere trasmesso sia su piattaforma internet sia via etere, ad esempio su piattaforma DAB+/DMB. Si noti che la maggior parte degli utenti ascoltano la radio in movimento, servendosi di un'autoradio o un dispositivo portatile. E la ricezione in movimento è il punto di forza delle reti DAB+/DMB pienamente implementate. Per questo motivo il trasporto di segnali Surround su DAB+/DMB dovrà essere accompagnato da altri accorgimenti tecnologici, come la decodifica binaurale [3] per l'ascolto con cuffie o il posizionamento ottimale di diffusori e la riduzione del rumore nell'auto.

Il Centro Ricerche Rai ha integrato un sistema per la trasmissione e ricezione di segnali MPEG Surround, su tutta l'area di Torino, a scopo sperimentale. In Italia non sono ancora presenti trasmissioni radio DAB+ Surround commerciali.

3. Descrizione del sistema MPEG Surround

Il sistema proposto permette di trasmettere servizi MPEG Surround 5.1 sulla Radio Digitale [4,5,6]. Il sistema è stato integrato per la messa in onda di MPEG Surround sull'area di Torino.

Come la radio in modulazione di frequenza (FM) aveva abilitato la trasmissione di segnali stereo analogici, così la Radio Digitale su DAB permette di raggiungere l'utente con segnali digitali Surround di elevata qualità, grazie alla tecnologia MPEG Surround [3,7] e allo standard di trasmissione DAB [9].

Lo standard MPEG-D [3] o SAC, consente la trasmissione di un segnale Surround 5.1 multicanale aggiungendo una frazione della banda necessaria per una trasmissione tradizionale (overhead limitato): tipicamente è sufficiente aggiungere il 10% del bit-rate totale di un canale stereo.

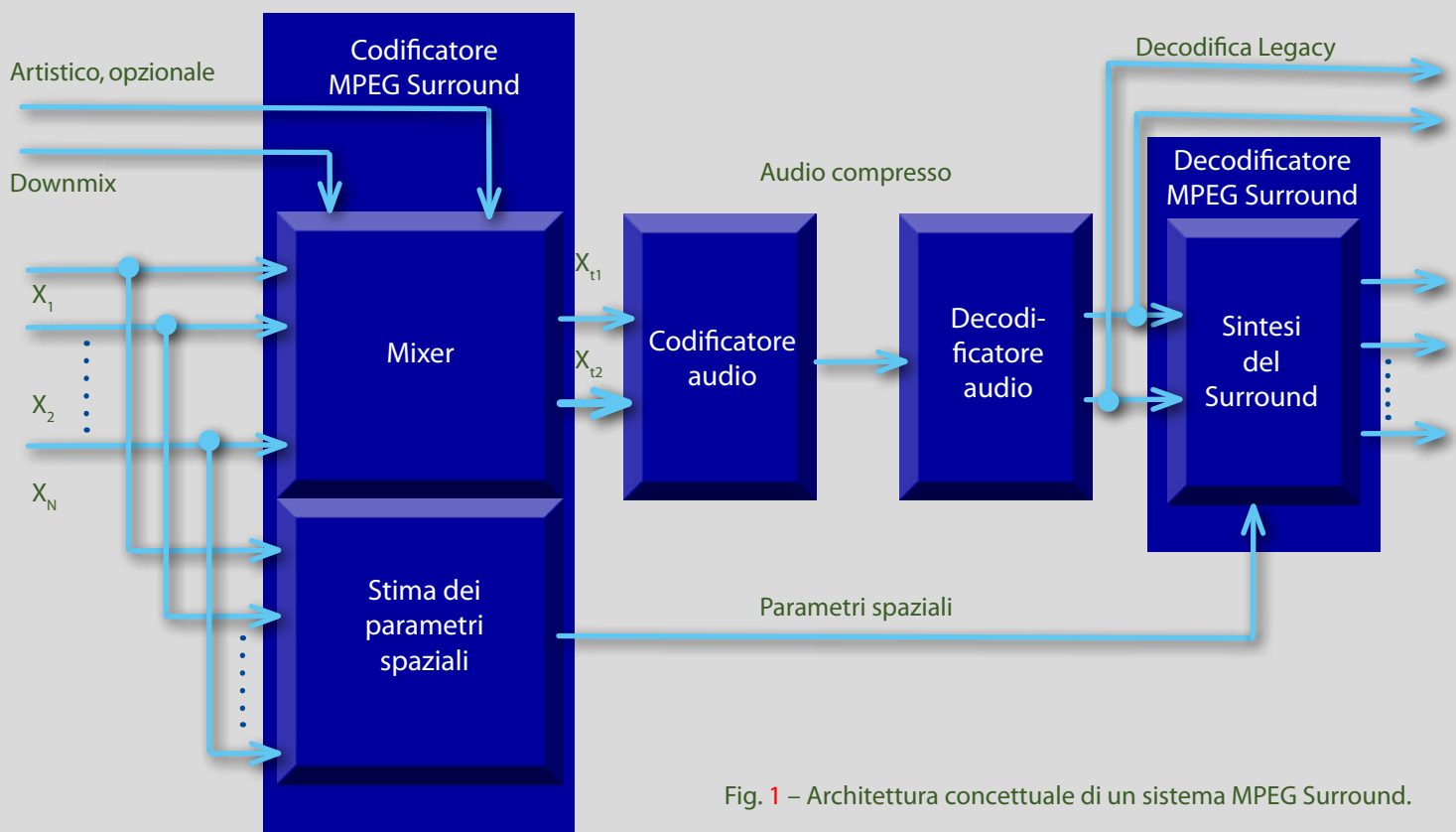



Fig. 1 – Architettura concettuale di un sistema MPEG Surround.

MPEG-D prevede infatti la codifica di N canali audio utilizzando M canali, in cui M<N; questa tecnica viene anche detta "matriciale" in quanto le tracce audio vengono combinate tra di loro per avere in uscita un numero inferiore di canali.

Nel caso in esame, i 6 canali in ingresso vengono codificati utilizzando 2 canali audio e 1 canale aggiuntivo con i parametri di codifica spaziale. In questo modo è possibile trasmettere il canale stereo insieme ad un canale aggiuntivo di dati MPEG Surround. Si noti che la codifica è di tipo *lossy* (con perdita), che si serve di tecniche pisco-acustiche per ridurre il bit-rate.

Un'altra caratteristica importante di MPEG Surround è che **in linea di principio è possibile utilizzare qualunque tipo di encoder per la compressione dei canali audio principali** (come si vede in figura 1, il calcolo dei parametri spaziali avviene prima della compressione dei canali audio trasmessi).

Si noti che MPEG Surround è quindi un sistema sostanzialmente diverso, tra gli altri, dal Dolby Digital 5.1, codificato con la tecnica AC3, che si limita a codificare i canali in modo indipendente.

Il vantaggio consiste nella compatibilità con i ricevitori che non implementano MPEG Surround: questi ultimi decodificheranno un normale segnale stereo, ignorando i dati aggiuntivi MPEG Surround.

Il consorzio WorldDMB ha quindi standardizzato l'incapsulamento di MPEG Surround su DAB, DAB+ e DMB [9]. La normativa prevede di trasformare i 6 canali in ingresso in 3 canali: due di questi andranno a formare un servizio stereo, il terzo, a basso bit-rate, conterrà i dati relativi alla stima dei parametri spaziali.

Una piattaforma reale che preveda la trasmissione di segnali DAB Surround può essere schematizzata come in figura 2.

Si vede il "DAB Surround Encoder" con le 6 sorgenti in ingresso. L'uscita dell'encoder (generalmente

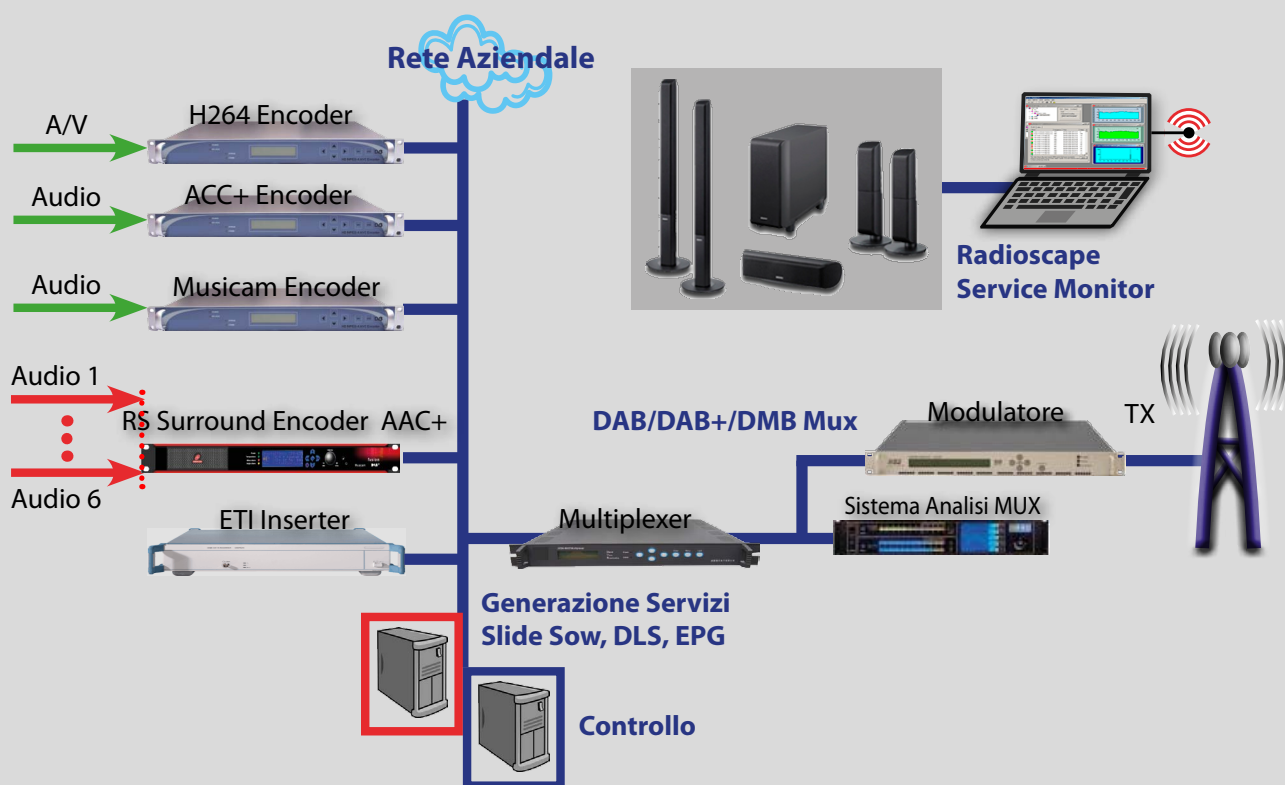



Fig. 2 – Piattaforma per la trasmissione del segnale DAB Surround.

Fig. 3 – Encoder Surround RadioScape.

su IP) raggiunge un Multiplexer, che provvede ad inserirla nell'ensemble DAB/DAB+/DMB. I canali audio in ingresso (6 in tutto) vengono analizzati dall'Encoder DAB Surround, che effettua un down mix producendo in uscita due canali con compressione AAC+, con un bit-rate specificato e un canale dati a basso bit-rate con i parametri di codifica audio spaziale. L'encoder stabilisce anche quali sono i due canali principali: questi verranno riprodotti da qualunque ricevitore DAB+, indipendentemente dalla sua compatibilità con MPEG Surround. Gli altri 4 canali verranno inseriti parametricamente in un canale di dati che solo i ricevitori compatibili MPEG Surround decodificheranno (canale X-PAD). Tutti gli stream vengono quindi inseriti nell'insieme dei servizi della radio digitale (*ensemble*). L'ensemble viene quindi trasportato su ponte radio alla stazione di trasmissione, sul colle dell'Eremo, dove avviene modulazione e trasmissione sull'area di Torino.

4. La soluzione utilizzata per i test su DAB+

L'encoder utilizzato per i test descritti in questo articolo è il RadioScape Surround Encoder. L'encoder permette di codificare segnali live, in tempo reale (figura 3).

L'encoder permette di codificare un segnale audio su 6 canali (6 ingressi analogici bilanciati oppure digitali AES/EBU). Si è scelto questo dispositivo per la possibilità di integrazione con il sistema di test pre-esistente in uso al Centro Ricerche Rai.

Quando sono stati eseguiti i test non esistevano, a conoscenza di chi scrive, ricevitori consumer DAB Surround. Una possibilità per la ricezione dei segnali DAB Surround è quella di utilizzare il ricevitore DAB Scout dell' IRT (*Institut für Rundfunktechnik*) in associazione con un opportuno software di codifica DAB Surround. Un'alternativa, scelta per i test in questione, era l'utilizzo di un'unità di ricezione e test DAB RadioScape, come il RadioScape Service Monitor.

5. Setup e test effettuati

I test eseguiti hanno raggiunto due obiettivi:

- ✓ La validazione del sistema end-to-end, con codifica, trasmissione, ricezione e decodifica di un segnale audio Surround 5.1
- ✓ La verifica della compatibilità del sistema con i ricevitori pre-esistenti, che non implementano questa parte di standard. I ricevitori dovranno essere in grado di riprodurre un audio stereo.

E' stato utilizzato un lettore DVD Blu-Ray Sony BDP-S550 con sei uscite analogiche, collegato al Radioscape Surround Encoder mediante gli ingressi analogici bilanciati di quest'ultimo. L'Encoder Surround è stato configurato per produrre uno stream di 128 kbps, con due canali AAC+ stereo, e un canale di dati per la ricostruzione matriciale del segnale multicanale. L'audio così codificato è stato incapsulato in pacchetti UDP (protocollo di trasporto su internet, unidirezionale) e inviato al Multiplexer DAB/DAB+/DMB, e da qui al ponte radio per la trasmissione sull'area di Torino. Al Centro Ricerche è stato poi equipaggiato il Radioscape Service Monitor con l'opzione Surround. Una scheda audio compatibile e un sistema di casse Home Theater hanno completato la postazione di ricezione. Il ricevitore è stato in grado di riprodurre correttamente i segnali trasmessi (figura 4).

Per la verifica dell'interoperabilità con ricevitori pre-esistenti, era necessario verificare che anche un ricevitore DAB+ non abilitato MPEG Surround fosse

comunque in grado di riprodurre correttamente un audio stereo utilizzando i due canali principali. A questo scopo ci si è valsi di ricevitori handheld iRiver B20 e B30, di radio Pure Sensia e Pure Evoke-2S. I ricevitori, una volta sintonizzati sul canale DAB+ MPEG Surround hanno decodificato correttamente la parte stereo del segnale multicanale 5.1.

6. Normativa

Per valutare il possibile impatto del DAB Surround sul futuro mercato dei ricevitori DAB occorre verificare la compatibilità di questo standard con i Profili per il ricevitore Radio Digitale Europeo stilati dal WorldDMB in collaborazione con EBU e Digital Europe[Nota1] [10].

Ogni profilo definisce un insieme minimo di requisiti e caratteristiche che servizi e ricevitori devono soddisfare. Lo scopo dei profili è di rendere il mercato europeo di ricevitori e servizi di radio digitale ampio ma conservando l'interoperabilità fissato un profilo.

Sono stati definiti 3 diversi profili, che si elencano in ordine di complessità crescente:

- **Standard Radio** (Profilo 1): ricevitore audio di base, con display alfanumerico
- **Rich Media Radio** (Profilo 2): ricevitore con display a colori almeno 320x240, può visualizzare immagini e supporta BIFS, utilizzato per la descrizione di elementi interattivi nell'immagine
- **Multimedia Radio** (Profilo 3): ricevitore in grado di riprodurre correttamente anche il video

I profili sono stati creati dal WorldDMB e recepiti dalla EBU attraverso la Raccomandazione R 126 del 2009.

In Italia, oltre la piena approvazione dei profili europei, l'Associazione per la Radio Digitale (ARD) con Rai Way in prima fila, ha creato una raccomandazione aggiuntiva (ARD-Book) che promuove la creazione di 3 bollini di certificazione per i ricevitori radio digitali, in sostanza suddividendo in modo più fine i profili 1 e 2 della Raccomandazione EBU.

Fig. 4 – Stazione ricevente.

Come si è visto, il DAB Surround è uno standard fin dal 2005 [7], e si basa sullo standard [3]. Il DAB Surround è compatibile con i profili di ricevitore del WorldDMB, come servizio opzionale, perché tale è l'audio multicanale nella normativa ETSI, si veda ad esempio [9]. I ricevitori che non implementano la specifica DAB Surround decodificheranno in modo trasparente un canale DAB/DAB+/DMB stereo. Si tenga anche presente che tecniche di decodifica binaurale (*binaural decoding*) permettono di ottenere anche con l'uso di cuffie, quindi in ricezione mobile, un nuovo livello di realismo sonoro.

Nota 1 - Digital Europe: dal 2009 la nuova denominazione della European Information, Communications and Consumer Electronics Industry Technology Association (EICTA).

7. Conclusioni

Lo standard MPEG Surround rappresenta una tecnologia matura e in linea con le raccomandazioni europee per i ricevitori di Radio Digitale.

I test tecnici condotti dal Centro Ricerche su un sistema MPEG Surround su DAB+ integrato per l'occasione ne hanno verificato il funzionamento. Il sistema ha riprodotto correttamente un segnale MPEG Surround trasmesso dal Centro su tutta l'area di Torino.

Inoltre è stata confermata la compatibilità del segnale DAB MPEG Surround con dispositivi preesistenti, caratteristica essenziale per una graduale introduzione in reti commerciali già esistenti.

MPEG Surround è un passo ulteriore verso un servizio che metterà l'utente nelle condizioni di gradire e vivere con più intensità e più emozione ciò che viene ripreso e trasmesso. Quando il mercato offrirà ricevitori consumer in grado di ricevere i segnali surround da piattaforma DAB/DAB+ e DMB l'utente potrà vivere con la radio momenti sonori di ottimo realismo.

Bibliografia

1. L. Scopece, A. Farina, A. Capra, "3D - Virtual Microphone System - Sonda Microfonica ad Elevata Direttività", Elettronica e Telecomunicazioni, in questo numero.
2. A. Capra, L. Chiesi, A. Farina, L. Scopece, "A Spherical Microphone Array for Synthesizing Virtual Directive Microphones in Live Broadcasting and in Post Production", 40th AES International Conference: Spatial Audio: Sense the Sound of Space (Tokyo, Japan, 8-10 October 2010).
3. ISO/IEC 23003, "Information technology - MPEG audio technologies - Part 1: MPEG Surround", ISO/IEC, 2007.
4. Sito World DMB, ultimo accesso 1 Dicembre 2009, www.worlddab.org
5. P. Casagranda, A. Gallo, S. Ripamonti: "Il Sistema DAB/DAB+/DMB per la Radio Digitale", Elettronica eTelecomunicazioni, Agosto 2009.
6. G. Alberico, P. Casagranda, F. Russo: "Servizi Multimediali per la Radio Digitale", Elettronica e Telecomunicazioni, Aprile 2010.
7. J. Breebaart, J. Herre et al. "MPEG Spatial Audio Coding / MPEG Surround: Overview and Current Status", Audio Engineering Society Convention, 2005.
8. H. Fuchs, O. Korte and J.Hilper: "Digital Broadcasting with MPEG Surround", EBU Technical Review, 2009.
9. ETSI TS 102 563, "DAB: Transport of Advanced Audio Coding (AAC) audio", ETSI, 2005.
10. WorldDMB Forum, "Digital Radio Receiver Profiles", 2008.

3D - Virtual Microphone System

Sonda Microfonica ad Elevata Direttività

Leonardo **Scopece,**
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Angelo **Farina,**
Andrea **Capra**
Università di Parma - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Sommario
Sono descritte la teoria del nuovo sistema di ripresa e registrazione multicanale basato su 32 capsule posizionate su una sonda sferica e alcune applicazioni pratiche. Con questo sistema si possono sintetizzare in tempo reale fino a 7 microfoni virtuali potendo scegliere dinamicamente la loro direttività (partendo da un omnidirezionale, passando ad un cardioide standard e arrivando ad un cardioide di ordine 6 ultradirettivo) e la loro posizione spaziale. Un'interfaccia grafica ne permette il posizionamento ed il movimento su un'immagine video a 360°. Il sistema è basato su una nuovo approccio matematico al calcolo della matrice di filtri FIR da convolvere in tempo reale con il segnale proveniente dalle capsule microfoniche; il tempo di latenza è ridotto grazie ad un processore di convoluzione partizionato.

1. Introduzione

Un precedente articolo [1] illustra l'attività di ricerca avviata dal Centro Ricerche della Rai e dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Parma che ha portato alla progettazione e realizzazione di un sistema di ripresa e registrazione basato sulla tecnica Ambisonic. Il sistema utilizza una sonda HOA ed è stato denominato 3D-VMS. I risultati conseguiti hanno consentito la definizione di un brevetto, depositato dalla Rai e da AIDA, spin-off dell'Università di Parma,

Il sistema ideato sfrutta una sonda microfonica a più capsule per consentire una flessibilità di impiego nelle produzioni audio/video in campo broadcast non ottenibile con i modelli microfonici "discreti" disponibili sul mercato.

I modelli microfonici discreti possono essere montati direttamente su telecamera e il loro movimento può essere sincronizzato automaticamente al mo-

vimento camera, ma non sono in grado di zoomare nel campo sonoro.

Il singolo microfono in posizione fissa restituisce come risultato una ripresa sonora "statica", che non corrisponde alla dinamica video correntemente impiegata nel broadcast, dove l'immagine non rimane fissa per più di pochi secondi.

Il sistema 3D-VMS consente una ripresa multimicrofonica o, in alternativa, surround, consente di realizzare lo zoom microfonico in modo dinamico e d in tempo reale, consente di posizionare più punti di ripresa sul piano azimutale e mediano (fino a 7 microfoni virtuali).

Questo articolo aggiorna quello precedentemente pubblicato [1] fornendo ulteriori dettagli sulle basi di funzionamento del sistema e considerazioni sulle sperimentazioni in diversi ambienti e campi di applicazione.

Acronimi e sigle	
3D-VMS	3D - Virtual Microphone System
ADAT	in origine Alesis Digital Audio Tape, ora indica l'interfaccia ottica per il trasferimento dell'audio digitale (ADAT Optical Interface)
AIDA	Advanced Industrial Design in Acoustic
CAT 5	cavo di CATegoria 5 per Ethernet
CAT 6	cavo di CATegoria 6, adatto fino a 10-Gigabit Ethernet
ESS	Exponential Sine Sweep
EMIB	Eigenmike® Microphone Interface Box
FFADO	Free FireWire Audio Drivers
FIR	Finite Impulse Response
GUI	Graphical User Interface
HOA	High Order Ambisonic
MATLAB	MATrix LABoratory, ambiente per il calcolo numerico e relativo linguaggio
MIDI	Musical Instrument Digital Interface

2. Microfoni virtuali

Negli ultimi anni sono state avviate diverse attività di ricerca per sviluppare tecnologie atte a registrare e riprodurre le proprietà spaziali del suono. Molti degli approcci proposti fanno uso di grandi schiere di microfoni e altoparlanti per elaborare i segnali sulla base di teorie matematiche complesse, evoluzioni del classico principio di Huygens.

Questi metodi si basano su rappresentazioni matematiche del campo sonoro, che viene decomposto in onde piane [2], in armoniche sferiche [3] o funzioni complesse di Hankel [4].

Qualunque metodo venga utilizzato, alla fine ci si può ricondurre al calcolo come sintesi di un numero di **microfoni virtuali**, ciascuno dei quali alimenta un altoparlante nel sistema di ascolto.

L'approccio scelto **non** utilizza nessuna rappresentazione matematica del campo sonoro, vuole invece identificare una soluzione numerica in grado di ottenere direttamente i coefficienti dei filtri utili a sintetizzare ciascun microfono virtuale con direttività e direzione di puntamento arbitrari.

Sebbene questo approccio possa funzionare, in linea di principio, con qualsiasi tipo di geometria della schiera di microfoni, si è deciso di sviluppare il sistema utilizzando una sonda microfonica sferica costituita da 32 capsule di elevata qualità, recentemente disponibile sul mercato.

I 32 segnali sono filtrati impiegando un potente processore di convoluzione, capace di sintetizzare in tempo reale fino a 7 microfoni virtuali e di definire la loro posizione e direttività utilizzando come dispositivo di controllo un joystick o un mouse; la gestione del sistema da parte dell'operatore è facilitata dall'uso di una videocamera panoramica a grand'angolo e di una una interfaccia grafica di uso intuitivo.

La gestione può avvenire in tempo reale e con bassi tempi di latenza durante un evento dal vivo. In alternativa, i segnali "grezzi" delle 32 capsule possono essere registrati, insieme al video panoramico, consentendo la loro elaborazione e la sintesi dei microfoni virtuali in fase di post-produzione.

I microfoni virtuali sintetizzati possono essere altamente direttivi (con diagrammi polari costanti con la frequenza, e con apertura del fascio di ripresa molto definita come quella di un microfono "a fucile"); sono intrinsecamente coincidenti, in modo da miscelare i segnali senza problemi di comb-filtering; è possibile muovere continuamente i microfoni sulla scena per seguire attori e/o cantanti, o per dare voce al pubblico presente.

La registrazione di un concerto è solo uno dei possibili scenari in cui utilizzare questo schema; un altro fra gli scenari testati è quello teatrale.

Un'attenta analisi delle prestazioni del nuovo sistema microfonico ha mostrato che la risposta in frequenza, il rapporto segnale-rumore e la reiezione del suono al di fuori del fascio di ripresa sono migliori di quelli ottenuti impiegando algoritmi di elaborazione tradizionali applicati agli stessi segnali d'ingresso, o di microfoni altamente direttivi dedicati.

Fig. 1 – Schema di elaborazione dei segnali.

3. Descrizione del sistema

3.1 Filtri digitali per microfoni virtuali

Dato un array di trasduttori, si può utilizzare un set di filtri digitali per creare i segnali in uscita (figura 1). Nel nostro caso occorre convertire gli ***M*** segnali che arrivano dalle capsule in ***V*** segnali corrispondenti ai microfoni virtuali desiderati: è necessario utilizzare una matrice ***M***×***V*** di filtri FIR.

Assumendo $\boldsymbol{x}_m$ come segnali di ingresso di ***M*** microfoni, $\boldsymbol{y}_v$ come segnali di uscita di *V* microfoni virtuali e $\boldsymbol{h}_{m,v}$ la matrice di filtri, i segnali elaborati possono essere espressi come:

$$y_v(t) = \sum_{m=1}^{M} x_m(t) * h_{m,v}(t)$$

Dove ∗ rappresenta la convoluzione, e quindi ciascun segnale del microfono virtuale è ottenuto sommando i risultati delle convoluzioni degli ***M*** ingressi con un opportuno set di ***M*** filtri FIR.

In via di principio questo approccio permette di sintetizzare microfoni virtuali aventi un pattern di direttività arbitrario. In pratica si è deciso, per ora, di sintetizzare microfoni virtuali a cardiode di ordine superiore indipendenti dalla frequenza, come mo-

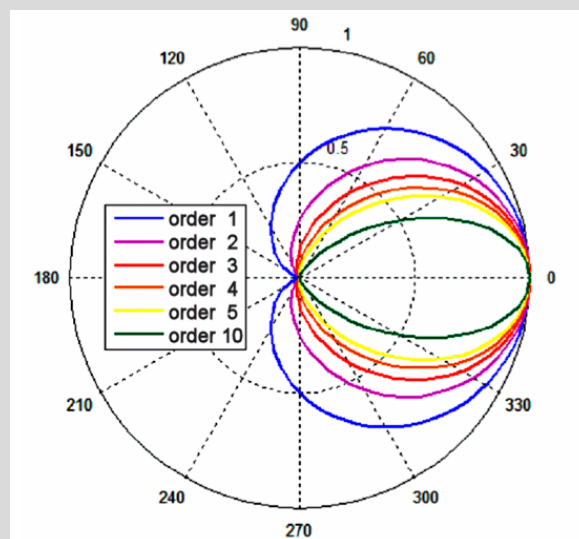



Fig. 2 – Diagramma polare di microfoni virtuali a cardioide di vari ordini.

strato in figura 2, e specificare la direzione di puntamento in coordinate polari (azimuth ed elevazione).

I coefficienti dei filtri ***h*** sono normalmente calcolati seguendo una delle complesse teorie matematiche, basate sulla soluzione dell'equazione d'onda [2,3,4], spesso sotto alcune semplificazioni, si assume che i microfoni siano ideali e identici.

I criteri di progetto seguiti, invece, non sono basati sulla scelta di una teoria specifica: il set di filtri ***h*** sono derivati direttamente da set di misure, fatte all'interno di una camera anecoica.

E' costruita una matrice di coefficienti di risposta all'impulso in base alle misure; la matrice inversa è calcolata numericamente (impiegando tecniche di approssimazione, come il metodo dei Minimi Quadrati più la regolarizzazione); in questo modo le uscite dell'array microfonico sono in linea di massima molto prossime alle risposte ideali. Questo metodo corregge anche deviazioni del trasduttore e artefatti acustici (schermatura, diffrazione, riflessione, ecc.).

I dettagli matematici per il calcolo dei coefficienti dei filtri sono illustrati in [5].

3.2 Il modello microfonico

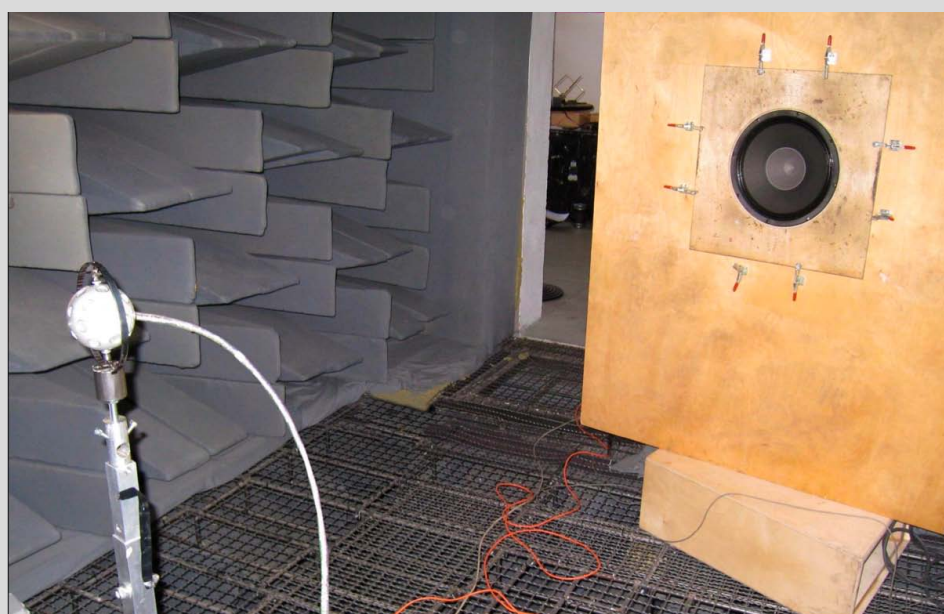
La sperimentazione descritta in questo articolo è stata realizzata usando l'array microfonico Eigenmike™ prodotto dalla MH Acoustics [6].

Questa sonda microfonica (figura 3) è costituita da una sfera di alluminio, di raggio pari a 42 mm con 32 capsule di alta qualità posizionate sulla sua superficie; i microfoni, preamplificati e convertiti da analogico in digitale sono all'interno della sfera e tutti i segnali sono trasferiti all'interfaccia audio utilizzando un cavo CAT-6 e protocollo Ethernet basato su A-net.

L'interfaccia audio è denominta EMIB: basata sul chip TCAT DICE II, opera con i sistemi operativi Windows, OSX e Linux utilizzando FFADO. La scheda dispone di due uscite analogiche in cuffia, un'uscita digitale ADAT e una porta word clock per sincronizzarsi con apparati esterni.

Il sistema è in grado di registrare 32 canali con una risoluzione di 24 bit, e con frequenza di campionamento di 44,1 o 48 kHz.

Fig. 3 – sonda microfonica.

Fig. 4 – Il sistema microfonico nella camera anecoica.

Il controllo dei guadagni dei preamplificatori avviene attraverso il controllo MIDI; è stata sviluppata una GUI in linguaggio Python per permettere un semplice controllo del guadagno in tempo reale, con nessuna latenza e nessuna interruzione.

3.3 Caratterizzazione sperimentale del modello

Le misure dell'array microfonico sono state effettuate impiegando il metodo ESS, allo scopo di ottenere 32 risposte all'impulso per ciascuna direzione di arrivo del segnale test.

Tali misure sono state effettuate all'interno di una camera anecoica, per evitare riflessioni indesiderate e per massimizzare il rapporto segnale/rumore.

L'altoparlante e la camera anecoica sono state gentilmente forniti dalla Eighteen Sound di Reggio Emilia, che ha anche provveduto all'uso di un altoparlante di alta qualità per le misure, come mostrato in figura 4.

Il sistema è stato ruotato lungo l'azimuth (di 36 passi) e in elevazione (di 18 passi) usando un'attrezzatura mobile per la rotazione azimutale e una piattaforma girevole per l'elevazione. In questo modo si sono ottenute 36x18x32 risposte all'impulso, ciascuna di 2048 campioni (a 48 kHz).

Fig. 5 – Cardioide del 3° ordine.

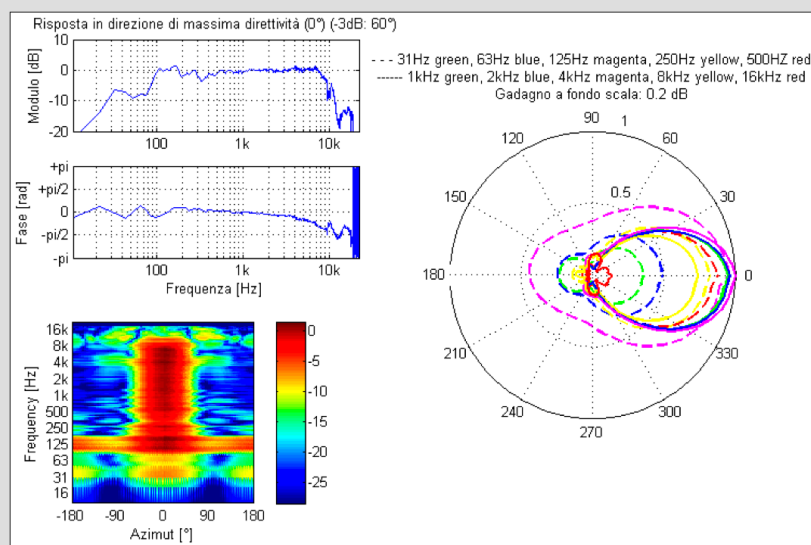



Fig. 6 – Cardioide del 6° ordine.

3.4 Sintesi e test dei microfoni virtuali

Per ottenere la matrice di filtri è stato realizzato uno script MATLAB.

La convoluzione della matrice dei FIR con i 32 segnali provenienti dalle capsule dell'array, deve fornire come uscite i segnali dei microfoni virtuali con le caratteristiche desiderate. Nelle figure 5 e 6 sono riportati risultati sperimentali che mostrano alcuni dei differenti profili di direttività ottenuti.

3.5 Architettura e Interfaccia GraFica per l'Utente

Affinché un sistema venga usato in produzioni broadcast deve essere molto "robusto", senza complessità non necessarie. Occorre disporre di un'elevata potenza di calcolo per generare ed utilizzare in tempo reale i filtri FIR con basso tempo di latenza. A tale scopo il sistema è dotato di un'unità di elaborazione dei segnali dedicata, contenente una scheda madre mini-ITX molto potente con un processore

Fig. 7 – Componenti hardware del sistema. a Sonda microfonica, b interfaccia EMIB, c Unità di elaborazione dei segnali, d console di controllo (notebook), e dispositivo di puntamento (joystick); f cavo CAT 6, in questa applicazione può operare fino ad una lunghezza di 140 m, g interfaccia ottica ADAT, h interfaccia firewire, i collegamento via cavo Ethernet CAT 5 o WiFi, l collegamento via cavo o wireless.

Interfaccia audio (firewire)

Socket TCP/IP

FFADO driver firewire

BruteFIR RealTime

Convolver RealTime

Messaggi di controllo

Filtri sintetizzati

bflogic_em32.c

Brute FIR Logic Module

Segnali provenienti dalle capsule (32 canali)

Segnali relativi al microfono virtuale (7 canali)

JACK Audio Connection Kit

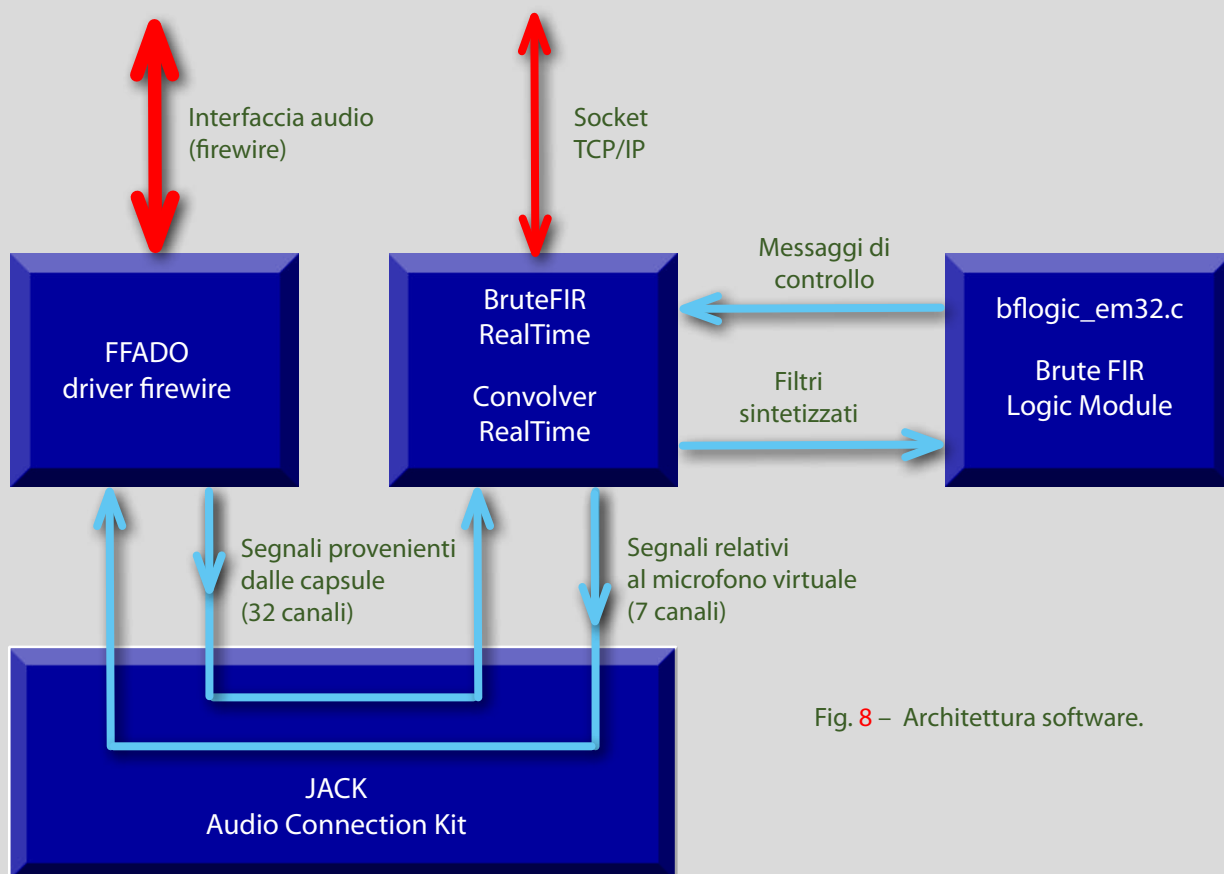



Fig. 8 – Architettura software.

Quad Core. L'elaborazione dei dei segnali audio viene effettuata da questa unità.

Per il controllo visuale delle caratteristiche di ogni microfono virtuale viene utilizzato un notebook comunicante con l'unità di elaborazione tramite rete IP; per modificare in tempo reale le direttività e gli orientamenti dei microfoni virtuali l'utente ha a disposizione un joystick o un mouse (figura 7).

Lo schema in figura 8 rappresenta l'architettura software adottata nell'unità di elaborazione dei segnali.

L'interfaccia utente è progettata allo scopo di seguire gli attori o le sorgenti in movimento, dando modo di verificare la posizione dei segnali audio dal vivo. A questo scopo, la GUI (figura 9) permette di focalizzare i microfoni su uno flusso video partendo da una camera di sorveglianza panoramica, posta in prossimità della sonda microfonica.

4. Esempi di applicazione e sperimentazioni

Nell'articolo pubblicato l'anno scorso [1] sono elencate le tipologie di eventi in cui il sistema può essere applicato vantaggiosamente: ripresa di orchestra , ripresa di eventi sportivi, teatrali, televisivi, radiofonici, di talk show e diffusione di una scena in un ambiente diverso da quello di ripresa.

Nel corso degli ultimi mesi sono state effettuate numerose sperimentazioni, verificando le caratteristiche del sistema nelle varie condizioni di ripresa, produzione e post-produzione. In alcuni casi sono stati messi a confronto il sistema olofonico (microfono Holophone H2Pro), citato in [1] e oggetto di precedenti articoli, con il sistema 3D-VMS.

4.1 Concerto presso Auditorium

Una prova relativa alla ripresa di un concerto è stata effettuata presso l'Auditorium Rai a Torino (figura 10). La prova comparativa fra la ripresa con microfono olofonico e sistema 3D-VMS è avvenuta nel corso delle prove generali di un concerto di Sostakovich.

I due tipi di microfono sono stati posti su due aste, molto vicine tra loro.

Il risultato, con la posizione delle aste alle spalle del Direttore d'Orchestra, è risultato molto buono, presente e gradevole per entrambe le tipologie.

Il prodotto registrato con il microfono olofonico è più "squillante", ma ciò non implica necessariamente maggior gradevolezza rispetto a quello ottenuto

Fig. 9 – GUI. Si noti lo slider utile per regolare la trasparenza dei puntatori colorati sovrapposti all'immagine video.

Fig. 10 – Torino, 13 maggio 2010. Concerto di musica classica presso Auditorium Rai.

con il sistema 3D-VMS. E' stato notato in alcuni momenti una leggera controfase sul prodotto olofonico, assente nel caso del sistema 3D VMS.

4.2 Concerto presso Studio Radiofonico

La ripresa è avvenuta in occasione del concerto in ricordo del terremoto de L'Aquila "Per non dimenticare", in uno Studio Radiofonico Rai.

Anche in questo caso (figura 11) la sonda microfonica era posta al centro, alle spalle del Direttore d'Orchestra. Sulla stessa staffa erano disposti una telecamera per l'interfaccia di servizio del sistema 3D-VMS ed il microfono olofonico.

Il risultato sonoro è stato soddisfacente, anche grazie all'acustica dello studio ed alla presenza del pubblico, che ha costituito un buon assorbitore.

Il giudizio sul confronto con il microfono olofonico è da considerarsi puramente soggettivo: il segnale olofonico è sembrato meno cupo dell'ambisonico, ma in generale meno soddisfacente.

Fig. 11– Roma, 14 aprile 2010. Concerto di musica classica presso Studio Radiofonico Rai in Via Asiago.

4.3 Programma in Studio Televisivo

La sperimentazione di ripresa effettuata durante la realizzazione una puntata del programma Melevisione (figura 12) ha ottenuto risultati poco significativi a causa della distanza a cui ci si è posti con la sonda per non intralciare il lavoro degli addetti, infatti la scenografia, tipica del format, occupa la maggior parte dello spazio di scena.

Malgrado le condizioni non favorevoli, il suono delle voci è risultato buono, anche se in alcuni momenti "fuori fuoco".

Fig. 12– Torino, 9 settembre 2010. Programma televisivo Melevisione presso Studio TV al Centro di Produzione Rai.

4.4 Opera lirica: "La Bohème" al Teatro Regio

Il sistema 3D-VMS è stato utilizzato nel corso delle prove generali, presente il pubblico, de "La Bohème" al Teatro Regio di Torino (figura 13).

La sonda microfonica, per motivi di regia, è stata posta su un'asta davanti alla prima fila in platea, ma non in posizione centrale, leggermente spostata verso destra di circa 20° rispetto al centro, guardando il palcoscenico, con la fossa dei musicisti tra la sonda stessa ed il proscenio.

La sperimentazione ha consentito di verificare la possibilità, in post-produzione, di "traslare" al centro i 7 microfoni virtuali, mantenendo il rapporto spaziale tra loro.

Dal punto di vista acustico non si è ottenuto un buon risultato perché le voci dei cantanti erano molto lontane e inoltre "disturbate" fortemente dalla musica proveniente dalla fossa. Solo nel caso degli assoli le voci era riprodotte in modo più pulito, pur risultando comunque troppo distanti.

Fig. 13– Torino, 21 maggio 2010. Un'immagine delle prove generali dell'opera "Boheme" presso il Teatro Regio.

Fig. 14 – Milano, 20 ottobre 2010. Il Piccolo Teatro e la scena di "Arlecchino, servitore di due padroni", registrato in 3D HDTV per il video e 3D-VMS per l'audio.
Nella foto panoramica è visibile la sonda microfonica e valutabile la posizione inidonea ad essa assegnata.

4.5 Teatro: "Arlecchino" al Piccolo

Purtroppo nel caso della ripresa di "Arlecchino servitore di due padroni" al Piccolo Teatro di Milano è stato possibile posizionare la sonda solo in un luogo particolarmente infelice (figura 14): in galleria in posizione laterale, con una visione del palco veramente minima, con un'apertura di circa 10°.

Il recupero dell'informazione sonora ha richiesto un impegnativo lavoro di post-produzione, durato più di due settimane. Il risultato ha superato le più rosee aspettative, è stato possibile "estrarre" il parlato dei vari attori anche nelle condizioni più critiche (di schiena, lontani dal microfono, bisbiglio).

4.6 Concerto in Sala del Conservatorio

Durante il Concerto in re maggiore op.35 per violino e orchestra di Tchaikovsky (figura 15), l'asta con la sonda microfonica è stata posizionata al centro e alle spalle del direttore d'orchestra.

Il risultato ottenuto è stato molto soddisfacente, ha richiesto pochissimo lavoro di post-produzione.

Quando è possibile posizionare il microfono nel punto ottimale, frontale, si ottiene la miglior registrazione e l'effetto "pubblico" non risulta troppo disturbante.

Fig. 15 – Torino, 22 novembre 2010. Concerto presso il Salone del Conservatorio Giuseppe Verdi.

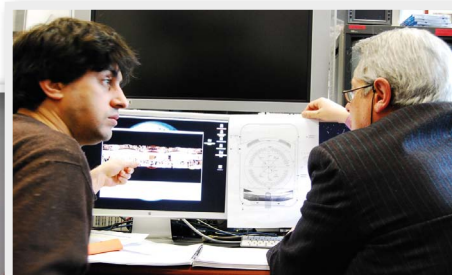



Fig. 16 – Milano, 27-28 febbraio e 1 marzo 2011. Composizione "Mise en abîme" presso lo Studio 3 del Centro di Produzione Rai. Nel riquadro il compositore, sulla sinistra, analizza le caratteristiche volute per la ripresa mediante il sistema 3D-VMS.

4.7 Concerto in Studio Televisivo

"Mise en abîme" (in italiano "messa in abisso") è una composizione del M° Yuval Avital, creata per un organico strumentale e corale di massa, utilizza lo spazio come un elemento essenziale della partitura.

La Rai, in accordo e in collaborazione con il Teatro Franco Parenti, con Magà Global Arts e l'Università di Milano, ha sperimentato l'uso del sistema 3D-VMS per riprendere questa particolare composizione.

La ripresa sperimentale è stata effettuata allo Studio 3 del Centro di Produzione Rai di Milano (figura 16).

L'ensemble musicale, disposto su una circonferenza, è particolarmente articolato e complesso composto da 32 fisarmoniche, 2 fisarmoniche basse, 2 bassi tuba, 1 clarinetto basso, 1 soprano, 1 percussione e 1 didgeridoo. Il coro è costituito da oltre 100 voci di non professionisti disposti su una circonferenza esterna ed esegue una partitura alfabetica e grafica. I direttori sono quattro, due per il coro e due per gli strumenti.

La sonda microfonica è stata posta al centro delle due circonferenze. Inoltre, per avere un eventuale rinforzo sonoro, si sono utilizzati ulteriori 8 microfoni cardiodi a copertura di una suddivisione ideale della scena in 8 settori.

Dalle riprese è stato realizzato un prodotto quadrifonico di buona qualità, obiettivo della sperimentazione.

4.8 Opera lirica: "Nabucco" a Montecitorio

Le condizioni di ripresa dell'opera il "Nabucco" presso la Camera dei Deputati di Montecitorio (figura 17) e interpretata dall'Orchestra dell'Opera di Roma diretta dal Maestro Riccardo Muti non sono state, purtroppo, ottimali.

Infatti non è stato possibile collocare la sonda microfonica al centro dell'Orchestra, come inizialmente si era ipotizzato, poiché l'asta avrebbe "impallato" la ripresa video. La sonda è stata pertanto posizionata in galleria, ad una quindicina di metri dall'Orchestra, alle spalle del Maestro.

Questa limitazione, aggiunta all'acustica non ottimale della Camera, è la causa del risultato non entusiasmante, con l'eccezione dei pieni di orchestra e del coro.

Fig. 17– Roma, 22 marzo 2011. Opera lirica "Nabucco" alla Camera dei Deputati.

Fig. 18– Torino, 9 aprile 2011. Opera lirica “Rigoletto” al Teatro Regio.

4.9 Opera lirica: “Rigoletto” al Teatro Regio

La sperimentazione basata sulla ripresa del “Rigoletto” al Teatro Regio (figura 18) aveva l’obiettivo di valutare un’applicazione più articolata del sistema 3D-VMS.

E’ stata utilizzata una sola sonda microfonica, posta all’inizio del proscenio e quasi al centro vicino alla buca del suggeritore, per ottenere la registrazione dei 32 canali. Nella fase di post-produzione sono stati sintetizzati 7 microfoni frontali, puntati verso i cantanti, e, a partire dalla stessa registrazione multicanale, sono stati sintetizzati ulteriori 7 microfoni puntati in direzione opposta, verso l’orchestra. Al momento della pubblicazione di questo articolo, non è ancora stato analizzato il risultato, ma si hanno buone aspettative, sulla base della percezione in cuffia nel corso della ripresa.

4.10 Opera lirica: “Traviata” al Teatro Regio

Nel caso de “La Traviata” (figura 19) si sono utilizzate due sonde microfoniche: una nella stessa posizione utilizzata per il “Rigoletto”, la seconda posizionata su un’asta dentro la fossa, alle spalle del Direttore d’Orchestra. Il risultato della ripresa non è ancora stato analizzato, ma si suppone, con questa configurazione, di poter ottenere una riproduzione meglio definita delle componenti sonore, cantanti e orchestra. Sarà possibile valutare i possibili problemi di fase dovute alla miscelazione delle registrazioni provenienti dalle due sonde e le eventuali implicazioni sul prodotto finale.

Fig. 19– Torino, 20 aprile 2011. Opera lirica “La Traviata” al Teatro Regio.

5. Conclusioni

L'obiettivo del progetto era la realizzazione di un sistema microfonico capace di sintetizzare un significativo numero di microfoni virtuali, per i quali fosse possibile modificare dinamicamente e in tempo reale posizione e direttività. Il sistema sviluppato consente la definizione di microfoni virtuali i cui diagrammi polari possono variare con continuità dalle tipologie standard (come ominidirezionale o cardiode) fino a cardiodi molto direttivi del 6° ordine, tipologia di direttività risultata più stretta di quella dei microfoni "a fucile".

La metodologia di progetto adottata offre significativi vantaggi:

- ✓ la possibilità di operare in un ampio intervallo di frequenze, per una data dimensione della sonda;
- ✓ correzione delle differenze costruttive delle capsule;
- ✓ correzione parziale di artefatti acustici quali effetti di mascheramento, diffrazioni e risonanze.

Particolare attenzione è posta alle caratteristiche operative, specifiche per le applicazioni previste:

- ✓ la sonda microfonica è stata adattata appositamente alle specifiche indicate per uso broadcast: il colore non è riflettente alle luci di scena, è dotata di manico per renderne assimilabile l'uso a quello di un microfono, opera alla frequenza standard professionale pari a 48 kHz.
- ✓ l'interfaccia utente (GUI) è di uso semplice.
- ✓ è in corso l'unificazione delle due unità, quella di elaborazione dei segnali e quella di controllo (utilizzata per la registrazione e l'interfaccia utente); anche l'elaborazione sarà affidata al notebook (l'attuale unità di controllo) grazie all'incremento delle capacità di elaborazione delle CPU.
- ✓ di conseguenza è facilitata la sincronizzazione della ripresa video di servizio (necessaria per il puntamento dei microfoni virtuali) e del time-code, indispensabile per le operazioni di produzione e post-produzione.

Il sistema fornisce un approccio rivoluzionario alla ripresa del suono nel campo dei broadcaster e nelle produzioni di film e musica e le innovazioni previste comportano a breve il superamento delle attuali limitazioni, tipiche di un prodotto destinato alla sperimentazione, con miglioramenti significativi dal punto di vista operativo, tecnico e di ingombro.

L'estesa gamma di sperimentazioni ha dimostrato che, grazie alla flessibilità operativa, può trovare applicazione in produzione ed in post-produzione.

Ringraziamenti

Si ringraziano per la collaborazione nelle riprese, edizioni e consulenze tecniche e musicali, i colleghi Rai: Enrico Cavallini e Salvatore Cangialosi del Centro Ricerche, i colleghi di Strategie Tecnologiche-Qualità Tecnica e dei Centri di Produzione TV di Milano e di Torino. Un particolare ringraziamento ai colleghi della Radiofonia della Rai di Torino, a Radio Vaticana e al Settore Tecnico Audio/Video della Camera dei Deputati di Montecitorio.

Bibliografia

1. L. Scopece: "Sonda microfonica sferica per surround sound", Elettronica e Telecomunicazioni, Aprile 2010
2. A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis", Journal of AES, 93(5):2764–2778, May 1993.
3. S. Moreau, J. Daniel, S. Bertet, "3D sound field recording with High Order Ambisonics - objective measurements and validation of a 4th order spherical microphone", 120th AES Convention, Paris, France - May 20-23, 2006.
4. F. M. Fazi, P. A. Nelson, "The ill-conditioning problem in Sound Field Reconstruction", 123rd AES Convention, New York, NY, USA - Oct.5/8, 2007.
5. A. Capra, L. Chiesi, A. Farina, L. Scopece, "A Spherical Microphone Array for Synthesizing Virtual Directive Microphones in Live Broadcasting and in Post Production," 40th AES Int. Conf.: Spatial Audio, Tokyo, Japan, 8-10 Oct. 2010.
6. http://www.mhacoustics.com

Che cosa è, come funziona

L'acustica architettonica

Allestimento interno degli ambienti

Parte III

Leonardo **Scopece,**
Alberto **Ciprian**

Sommario
Per poter arrivare ad ottenere un trattamento acustico completo, è necessario collocare nella sala dei componenti acustici. Spesso, tuttavia, si rischia di scegliere la tipologia errata ottenendo un effetto insufficiente o comunque diverso dalle aspettative. Questo è il terzo di tre articoli riguardanti l'acustica architettonica e si occupa della descrizione dei vari tipi di componenti, analizzandone i pregi e i difetti a seconda del tipo di applicazione. Molte volte è necessario effettuare un'analisi teorica, in base alle conoscenze del comportamento fisico delle onde, sul posizionamento degli elementi e confrontare tale analisi con le applicazioni pratiche. Sono anche analizzati i sistemi surround, olofonico e ambisonico.
In conclusione sono illustrati esempi di sistemi reali: l'Auditorium della Rai di Torino e la Casa del Suono dell'Università di Parma.

1. Sistemi di diffusione e trattamento acustico

Molto spesso nella progettazione acustica di una sala non basta scegliere una pianta irregolare e dimensionare ad hoc i lati per creare le condizioni ottime per l'ascolto, ma è necessario agire in un secondo tempo per introdurre delle correzioni tecniche per veicolare le onde sonore in un certo modo e per equalizzare alcune gamme di frequenza specifiche, perché l'azione più o meno assorbente dei materiali non è sufficiente.

Per questo motivo si ricorre all'utilizzo dei sistemi di diffusione e assorbimento, che possono essere semplici componenti da aggiungere come *bass trap* ("trappola" per le basse frequenze) o *diffusori cilindrici*, oppure vere e proprie realizzazioni costruite appositamente per ricreare sensazioni sonore particolari, come nel caso dei sistemi home theatre o dei sistemi surround professionali.

1.1 Componenti

I componenti tecnici per agire sulla propagazione delle onde sonore sono di vario tipo, ma generalmente si possono distinguere in tre categorie:

- diffusori (piani, curvi, di Schrœder)
- bass trap
- DaaD

Ogni componente, ovviamente, è realizzato con un diverso tipo di materiale a seconda della funzione che deve svolgere. Ad esempio un diffusore curvo sarà costituito da un materiale meno assorbente rispetto a quello di un bass trap che ha il compito di assorbire le basse frequenze.

1.1.1 Diffusori

I diffusori sono componenti acustici basati generalmente sulle leggi fisiche della riflessione delle onde e hanno lo scopo di diffondere il suono in determinate direzioni contribuendo all'aumento della qualità complessiva della stanza.

Ne esistono tre categorie:

✓ ***diffusori piani***: sono della tipologia più semplice e sono costituiti essenzialmente da un piano di legno. Il loro comportamento è diverso a seconda della frequenza considerata, per questo motivo vengono definite due frequenze limite f_s e f_i.

Se si considera lo schema in figura 1, allora le frequenze limite valgono:

$$f_s = v \cdot \left[\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right) + B^2 \cdot cos^2 \vartheta \right]^{-1}$$

$$f_i = \left[\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right) + A^2 \right]^{-1}$$

Alle alte frequenze, superiori a f_s, l'onda è trasmessa in modo speculare e il diffusore si comporta come se fosse di estensione infinita, nell'intervallo compreso tra le due frequenze limite si ha un'attenuazione di 3 dB/ottava, mentre alle basse frequenze, inferiori a f_i, si verifica una diffrazione a causa di un'attenuazione che aumenta di 6 dB/ottava al diminuire della frequenza. Quando si analizzano frequenze superiori a f_s il pannello si comporta come se fosse un piano di larghezza ***B*** e di lunghezza ***A*** infinita. I valori ***s*** e ***r*** sono le distanze del pannello dalla sorgente e dal ricevitore, rispettivamente.

✓ ***diffusori curvi***: sono realizzati utilizzando superfici convesse in legno compensato o truciolato per diffondere il suono con angolo di irradiazione crescente all'aumentare del raggio di curvatora. Questi elementi fungono da assorbitori

Fig. 1 – Diffusore piano.

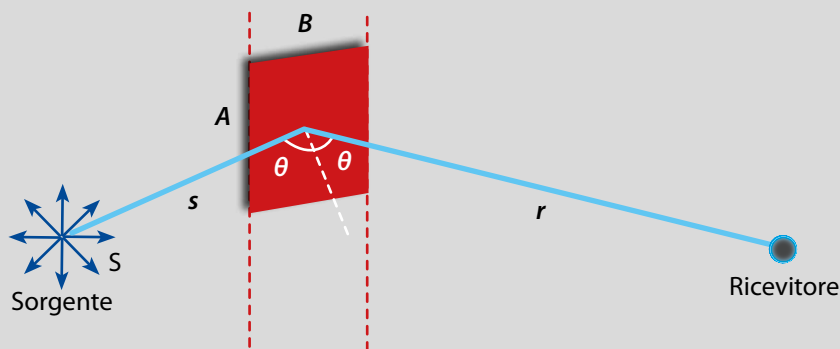
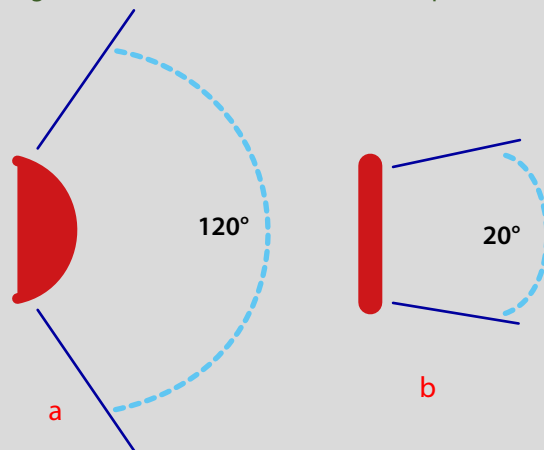



Fig. 2 - a) Diffusore curvo, b) Diffusore piano.

nella gamma delle basse frequenze, mentre la porzione irradiata è praticamente uguale a quella incidente, ad esempio, su un angolo di circa 120° (figura 2a), mentre un diffusore piano irradia il suono con un angolo molto più stretto (circa 20° - figura 2b).

Tutto ciò fa capire come generalmente si preferiscano i diffusori curvi sia nei piccoli che nei grandi ambienti. Le dimensioni del diffusore vanno sempre rapportate alla lunghezza d'onda del suono.

✓ ***diffusore di Schrœder***: sono sistemi acustici passivi[Nota 1] molto efficienti, costituiti da superfici sagomate "a greca" con una profondità proporzionale alla lunghezza d'onda di progetto (figura 3), mentre le fessure devono avere una larghezza minore della metà della minima lunghezza d'onda d'interesse.

Nota 1 - cioè, non contengono sistemi di altoparlanti.

Fig. 3 - Schema e immagine del diffusore di Schroder.

Il modello matematico su cui si basa l'idea di questi diffusori è quello della serie di residui quadratici, che si ottiene scegliendo un numero primo ***N***, elevando al quadrato i numeri compresi tra 0 e ***N-1*** e dividendo il valore ottenuto per ***N***. La serie dei resti di ogni divisione costituisce la serie di residui quadratici.

Per progettare un diffusore di Schrœder si devono seguire alcuni passi:

1. si sceglie il campo di frequenza in cui si desidera lavorare per ottenere una diffusione uniforme definendo una frequenza inferiore f_i e una frequenza superiore f_s;
2. si calcola il periodo da assegnare alla sequenza di fessure pari al numero primo più vicino al rapporto delle frequenze scelte in precedenza, quindi:

$$N = \frac{f_s}{f_i}$$

3. si definisce una lunghezza d'onda di progetto λ_s come la massima da diffondere:

$$\lambda_s = \frac{v}{f_i} = \frac{340}{f_i}$$

4. si calcola la larghezza ***w*** delle fessure come:

$$w = \frac{v}{2f_s} = \frac{340}{2f_s}$$

5. infine si calcola profondità:

$$d_n = \frac{\lambda_s \cdot S_n}{2N}$$

dove S_n indica il valore n-esimo della sequenza di residui quadratici.

Fig. 4 - Esempio di bass traps angolari.

Fig. 5 - Possibile collocazione in una sala prove.

Fig. 6 - DaaD.

1.1.2 Bass trap

I bass trap (figura 4) sono classificate come assorbitori acustici e sono utilizzati per ridurre in modo efficiente l'energia delle componenti del suono alle basse frequenze e per contrastare le risonanze.

Come tutti i dispositivi di assorbimento acustico, anche i bass trap lavorano dissipando l'energia sonora in calore per effetto dell'attrito. Grazie alla loro funzione vengono utilizzate soprattutto in ambienti in cui è necessario mantenere un suono chiaro e di ottima qualità, come ad esempio gli studi di registrazione e le regie audio. Generalmente vengono collocate in punti in cui si prevede la formazione di risonanze come gli angoli (figura 5).

1.1.3 DaaD

I DaaD[Nota 2] (figura 6) sono dei sistemi acustici passivi (che non hanno quindi un'amplificazione interna) che permettono di equilibrare il suono in base all'utilizzo scelto per la sala e al tipo di resa acustica che si vuole ottenere.

Ciò è reso possibile dal fatto che ogni DaaD è formato da un lobo diffondente, mentre gli altri sono tutti assorbenti. In questo modo è possibile ruotare il dispositivo al fine di ottenere particolari effetti e un miglior controllo del suono alle varie frequenze senza dover ricorrere ad altri sistemi di trattamento acustico. Questi sistemi possono quindi considerarsi come un'evoluzione e un miglioramento di sistemi come i bass trap.

Il loro rendimento è dovuto in gran parte alla tipologia di materiali di cui sono composti: la superficie esterna è formata da lastre di lamierino microforato, in modo tale da permettere alle onde sonore di entrare all'interno del dispositivo, in cui incontrano del materiale fonoassorbente.

Il funzionamento è basato sulla differenza di pressione che si crea tra l'interno e l'esterno del dispositivo nel momento in cui all'interno dell'ambiente in cui è posto il DaaD viene riprodotto un suono. Questa differenza, a sua volta, provoca uno spostamento d'aria all'interno del DaaD e, a causa dell'attrito prodotto dai materiali resistivi, viene ridotta l'energia sonora.

Nota 2 - *Diffusion Absorption Acoustic Devices.*

Ne esistono tre tipologie differenti (DAAD 2, DAAD 3, DAAD 4), che si differenziano in base alla gamma di frequenze che trattano e alla loro dimensione. In particolare: i DAAD 2 funzionano per risonanze superiori a 120 Hz, i DAAD 3 per risonanze superiori a 70 Hz e i DAAD 4 per risonanze superiori a 50 Hz.

Un altro aspetto che non deve essere trascurato è il posizionamento all'interno dell'ambiente. Infatti, essi agiscono sulla pressione sonora, quindi vanno collocati nei punti in cui la pressione stessa assume valori molto alti, come, ad esempio negli angoli e vicino a componenti come un subwoofer. Normalmente, per un ambiente di medie dimensioni ne servono almeno 10÷12, montati a colonna negli angoli. Ovviamente, volendo realizzare un trattamento ancora più efficace, ma molto più costoso, è possibile disporne un certo numero lungo le pareti, sempre controllandoli in punti in cui si concentra la pressione, perché se da un lato il grande vantaggio dei DAAD è quello di non colorare il suono, è anche vero che un errato posizionamento provoca un trattamento di scarsa qualità che ha come unico risultato un peggioramento della resa acustica.

1.2 Posizionamento dei componenti in base alle sorgenti virtuali

Il posizionamento dei vari componenti, i DAAD, nella stanza può essere studiato considerando, insieme ai metodi visti in precedenza, anche la teoria delle sorgenti virtuali.

Secondo questa teoria è possibile localizzare in modo abbastanza preciso quali zone delle pareti di una stanza sono interessate dalle onde propagate dalle sorgenti. Questo dato è molto importante per capire sia dove posizionare i componenti, ma anche per avere idea del numero di componenti necessari.

Il principio che sta alla base della teoria sostiene di considerare ogni parete come un asse di simmetria, in modo tale da riflettere ogni sorgente rispetto a tutte le pareti. Successivamente si traccia una linea di collegamento verso il punto di ascolto e si considera la copertura. Effettuando lo stesso procedimento per tutte le sorgenti virtuali si ottiene la copertura generale sulle pareti. In figura 7 è rappresentato l'esempio di una stanza in cui è stato realizzato un sistema di diffusione multicanale. I rettangoli al centro rappresentano la zona d'ascolto attorno alla quale sono collocati gli altoparlanti reali. Le zone colorate sulle pareti indicate sulle pareti rappresentano i punti in cui vanno collocati i componenti (distanziati tra loro di circa 40 cm), il numero di componenti è indicato nella legenda.

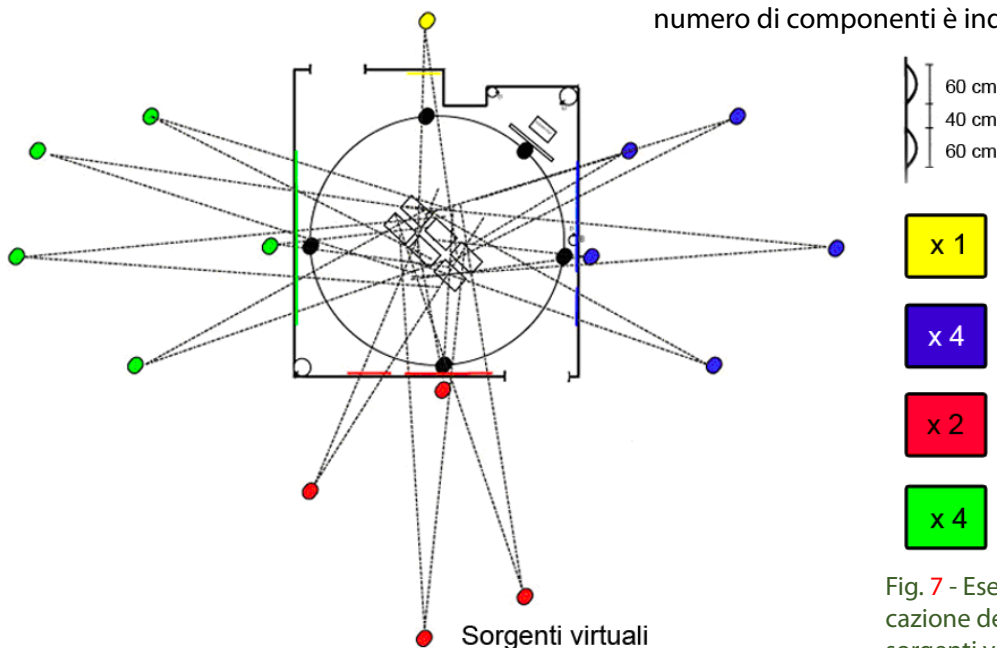



Fig. 7 - Esempio di applicazione della teoria delle sorgenti virtuali .

1.3 Sistemi Surround

Rappresentano l'evoluzione dei sistemi di diffusione stereo, i quali sono in grado di riprodurre soltanto due canali (destro e sinistro). I normali sistemi stereo lasciano un "buco" al centro del fronte sonoro, che viene però ricostruito virtualmente dal cervello dando un'immagine fantasma. É però da notare che essendo un fenomeno psicoacustico, l'immagine fantasma tende a spostarsi in funzione della posizione dell'ascoltatore. Per ovviare a questo inconveniente e per fare in modo di ricreare una scena sonora il più possibile immersiva, sono stati sviluppati sistemi surround, cioè tecnologie in grado di distribuire il suono attorno all'ascoltatore utilizzando un certo numero di altoparlanti a seconda del formato. I formati più diffusi sono il 5.1 e il 7.1, dove il primo numero indica la quantità di altoparlanti, mentre il numero dopo il punto indica la presenza di un elemento dedicato alla riproduzione delle basse frequenze (il subwoofer).

In questo modo è possibile inviare diversi tipi di segnale alle varie casse. Ad esempio, la riproduzione di film prevede la presenza di segnali corrispondenti a dialoghi principali, che vengono inviati al canale centrale, segnali legati alla musica ed effetti particolari, che vengono inviati alle casse laterali, e segnali corrispondenti a effetti secondari e rumori, che vengono inviati anche ai canali posteriori. Tutte le componenti a bassa frequenza (<110 Hz) vengono riprodotte dal canale LFE[Nota 3]. Nel caso della riproduzione di eventi reali registrati, questi sistemi permettono una totale immersione nella scena, tutto dipende in realtà anche dalla qualità della registrazione (ottima nei casi di utilizzo ad esempio di una sonda VMS 3D[Nota 4] o un microfono per l'olofonia).

Il posizionamento delle casse, la loro distanza dall'ascoltatore e la loro altezza non è casuale, ma è standardizzata dalla norma ITU-R BS 775:

- ✓ l'altezza della cassa deve essere di 1.20 m in modo da essere all'incirca coplanare con le orecchie dell'ascoltatore;
- ✓ la distanza dall'ascoltatore può essere scelta tra due opzioni: 2.4 m (casse anteriori) e 1.8 m (casse posteriori), oppure 3.5 m (casse anteriori) e 2.4 m (casse posteriori);
- ✓ gli angoli con cui orientare le casse sono invece schematizzati in figura 8[Nota 5].

Nota 3 - *Low Frequencies Emitter*.
Nota 4 - *Virtual Microphone System 3D*. Sonda formata da 32 capsule disposte su una sfera, equispaziate dal centro e posizionate secondo un certo valore di azimuth ed elevazione. I segnali acquisiti dalle capsule vengono preamplificati, codificati, multiplexati ed infine inviati tramite un cavo ethernet a un'interfaccia collegata a un computer al fine di sintetizzare più microfoni virtuali, i quali in fase di post-produzione possono essere modificati al fine di aumentarne la direttività.
Nota 5 - per semplificare la rappresentazione grafica le casse vengono disposte attorno a una circonferenza.

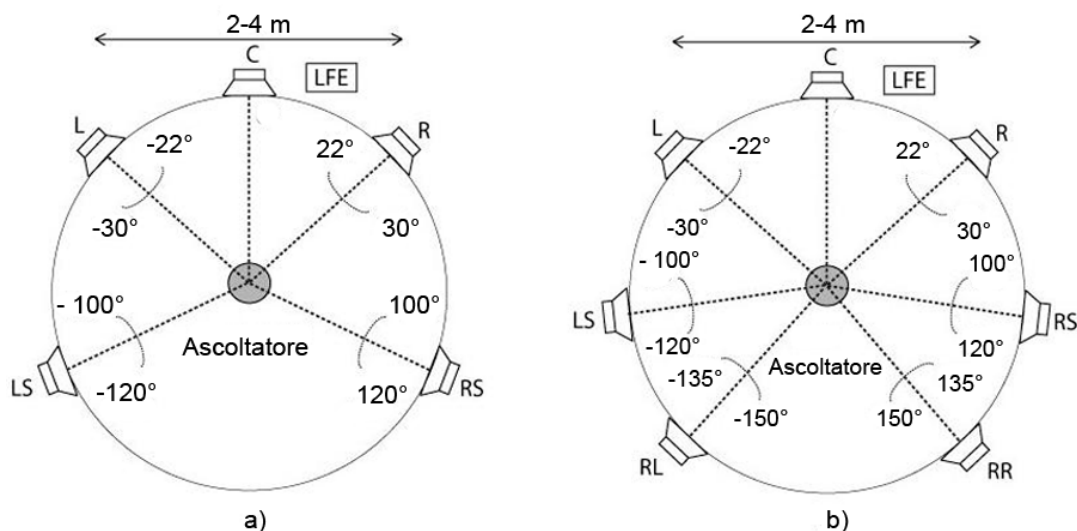



Fig. 8 - Orientamento delle casse nei sistemi 5.1 (a) e 7.1 (b).

1.4 Sistema di diffusione Ambisonics

Il sistema Ambisonic[Nota 6] consiste in una metodica di spazializzazione sonora, che comprende sia tecniche di ripresa e registrazione del suono che procedure di mixaggio e riproduzione. Si basa sulla creazione, nella zona di ascolto, di un campo sonoro il più possibile uguale a quello originale e in grado di riprodurre le stesse sensazioni psicoacustiche (ambiente, distanza, posizione e timbrica) che si ha ascoltando direttamente l'evento originale. Conoscendo infatti le informazioni relative alla pressione e alla velocità delle particelle d'aria in un determinato punto, è possibile ricostruire fedelmente il campo.

Le caratteristiche direzionali del campo acustico vengono ricostruite sommando le componenti armoniche sferiche del campo stesso, ognuna delle quali viene acquisita tramite un microfono con uguali caratteristiche di direttività.

A questo scopo esistono diverse tecnologie di acquisizione del segnale, tra cui: le sonde microfoniche Soundfield, Tetramic e più recentemente anche la sonda VMS 3D.

Dalla teoria psicoacustica si ricava che per frequenze minori di 700 Hz il meccanismo dominante di localizzazione sonora è la differenza di fase tra i segnali alle due orecchie, mentre alle frequenze medio-alte (700 Hz ÷ 5 kHz) è dominante la loro differenza energetica. Le informazioni sulla spazialità del campo acustico sono codificate, in fase di ripresa, tramite i segnali corrispondenti alla pressione e alla velocità delle particelle d'aria nel punto in cui è posta la sonda acustica. Per una ricostruzione solamente bidimensionale sono necessari almeno tre altoparlanti, mentre una riproduzione tridimensionale ne richiede almeno quattro. Le configurazioni di ascolto possono essere di diverso tipo con, ad esempio, quattro altoparlanti disposti ai vertici di un quadrato centrato sulla posizione d'ascolto (per una resa bidimensionale), oppure otto sistemati ai vertici di un cubo (per una restituzione tridimensionale).

In linea teorica la posizione ottimale dell'ascoltatore non è ristretta ad un punto, ma risulta essere estesa a una determinata porzione di spazio.

PRO:

- ☺ semplice sistema di registrazione[Nota 7];
- ☺ indipendenza del sistema di codifica da quello di decodifica (riproduzione) con array di altoparlanti.

CONTRO:

- ☹ le sorgenti irradiano soltanto onde piane;
- ☹ gli altoparlanti devono essere sufficientemente lontani dall'ascoltatore (questo è un problema non trascurabile in ambienti di piccole dimensioni).

1.5 La restituzione Ambisonic

La restituzione del segnale codificato B-format viene effettuata eseguendo apposite operazioni algebriche dei canali W, X, Y e Z, che sono ricavate in base ai principi generali della teoria della localizzazione sonora per ciascuna configurazione di riascolto. Un esempio può essere sviluppato considerando un insieme di otto altoparlanti disposti ai vertici di un cubo e diretti verso l'ascoltatore posizionato al centro della struttura (figura 9).

Nota 6 - Non esiste una vera spiegazione del termine Ambisonic. Dal punto di vista etimologico si potrebbe pensare come l'unione dei termini latini ambo (ambipolare) e sonus (suono), facendo quindi pensare alla possibilità del sistema di basarsi sulla teorie legate alla psicoacustica e alla spazializzazione del suono. Tuttavia ambo può anche far pensare al termine inglese ambient (ambiente), rimandando nuovamente all'idea della ricreazione del campo sonoro. Sempre ambo può far riferimento ai due parametri su cui si fonda la teoria: pressione e velocità delle particelle d'aria.
Nota 7 - una possibile soluzione consiste nell'utilizzare più microfoni (minimo quattro) disposti nello stesso punto, posizionati al centro della scena acustica.

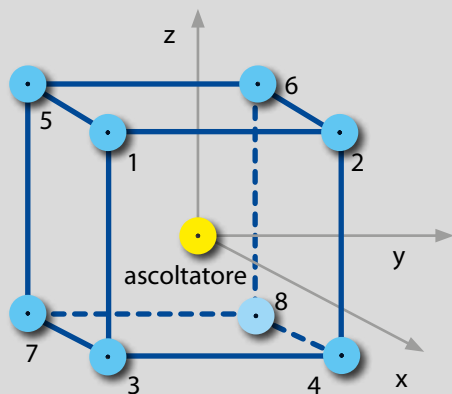



Fig. 9 - Configurazione minima per l'ascolto 3D.

Per questa configurazione le formule algebriche sono le seguenti:

$$Sgn1 = G_W \cdot W + G_X \cdot X + G_Y \cdot Y + G_Z \cdot Z$$
$$Sgn2 = G_W \cdot W + G_X \cdot X - G_Y \cdot Y + G_Z \cdot Z$$
$$Sgn3 = G_W \cdot W + G_X \cdot X + G_Y \cdot Y - G_Z \cdot Z$$
$$\ldots$$
$$Sgn8 = G_W \cdot W - G_X \cdot X - G_Y \cdot Y - G_Z \cdot Z$$

dove G_w, G_x, G_y, G_z sono termini di guadagno introdotti per ottimizzare la resa del sistema.

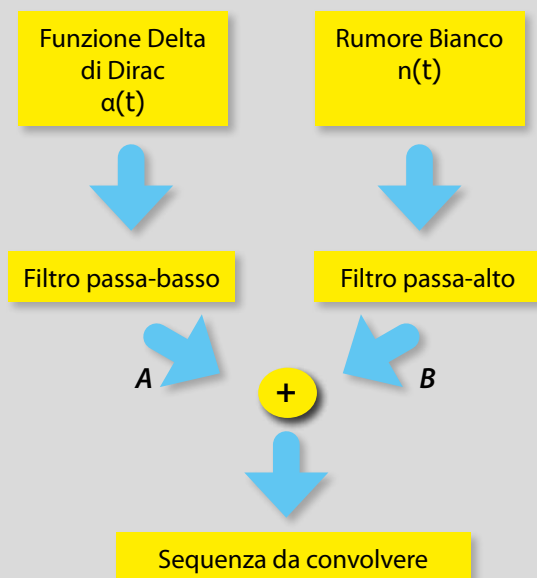



Fig. 10 - Schema della creazione dei segnali.

Nonostante l'uso di tali coefficienti, le immagini sonore prodotte appaiono inizialmente piuttosto instabili e la zona d'ascolto molto limitata nei pressi del centro del cubo.

Queste disomogeneità vengono attribuite ad interferenze e conseguenti cancellazioni in determinate porzioni della zona d'ascolto, dovute in gran parte alla parziale coerenza dei segnali provenienti dagli altoparlanti che sono sempre somme algebriche di W, X, Y e Z.

Per rimuovere questo inconveniente si è deciso di rendere casuali le fasi dei segnali che alimentano le casse, per far sì che, nella zona d'ascolto, l'energia risultante sia equivalente alla somma algebrica dei segnali. Questa operazione però riguarda solo lo spettro delle medie e alte frequenze (sopra i 700 Hz), poichè a frequenze inferiori è proprio la fase a stabilire la localizzazione e pertanto non deve essere alterata. Per garantire gli effetti desiderati vengono creati otto segnali differenti secondo lo schema in figura 10.

Ciascuno di questi segnali consiste nella somma degli altri due: il primo (***A***) contiene solo le frequenze inferiori a 700 Hz, mentre il secondo (***B***) contiene solo le frequenze maggiori. In particolare, il segnale ***B*** si ottiene filtrando con un filtro passa-alto un breve segmento di rumore bianco e possiede, in virtù delle proprietà del rumore bianco, valori di fase casuali. Il segnale ***A***, invece, si ottiene filtrando con un filtro passa-basso una funzione impulsiva (la delta di Dirac) e ha fase costante sotto i 700 Hz. Ciascuno degli otto segnali ottenuti viene convoluto con una delle tracce di restituzione e questo comporta un significativo aumento della focalizzazione e localizzazione delle immagini sonore, lasciando inalterata la zone utile d'ascolto.

1.5.1 Posizionamento degli altoparlanti

Uno dei maggiori vantaggi dell'Ambisonic consiste nel fatto che la parte di codifica è assolutamente indipendente dalla fase di ripresa; questo consente quindi una grande libertà di scelta sul numero di altoparlanti da utilizzare. Gli effetti che possono variare aumentando o diminuendo il numero di altoparlanti sono principalmente due: il senso di im-

mersione nella scena sonora (che aumenta quanto più è fedele e precisa la registrazione) e l'ampiezza dell'area d'ascolto (l'uso di molti altoparlanti garantisce un ascolto più realistico dovuto all'impressione di avere un'unica sorgente distribuita spazialmente).

Questi due parametri sono fondamentali per un sistema come Ambisonic, il quale ha come obiettivo la ricreazione tridimensionale della scena sonora. Come detto il numero di altoparlanti varia molto in funzione del tipo di resa sonora che si vuole ottenere e soprattutto alle dimensioni della stanza in cui effettuare la riproduzione. Questo ultimo punto rappresenta un elemento molto importante soprattutto quando si considerano stanze di piccole dimensioni e quindi quando è necessario valutare attentamente il comportamento acustico dell'ambiente in termini di riflessioni e risonanze. Per una buona resa gli altoparlanti devono essere collocati a distanza adeguata dalla posizione in cui si trova l'ascoltatore (circa 2 m).

Nel caso si voglia ottenere un effetto 2D il numero minimo di altoparlanti è quattro, mentre nel caso si voglia un effetto 3D il numero minimo di altoparlanti è otto, considerando l'ascoltatore al centro di un cubo con gli altoparlanti posizionati in prossimità degli otto vertici (figura 11). Risulta inoltre molto vantaggioso agganciare (e non fissare) gli altoparlanti al muro, soprattutto in situazioni sperimentali in cui è necessario modificare in tempo reale la configurazione della stanza per effettuare misurazioni e test.

1.6 L'olofonia

L'olofonia è una tecnica di registrazione e riproduzione sonora eseguita tramite un microfono, olofonico, il quale permette di riprodurre un suono in modo molto fedele rispetto all'originale. In fase di riproduzione il suono viene percepito nelle esatte coordinate spaziali di registrazione. In questo modo è possibile localizzare la provenienza di un suono in tutto lo spazio tridimensionale in modo accurato.

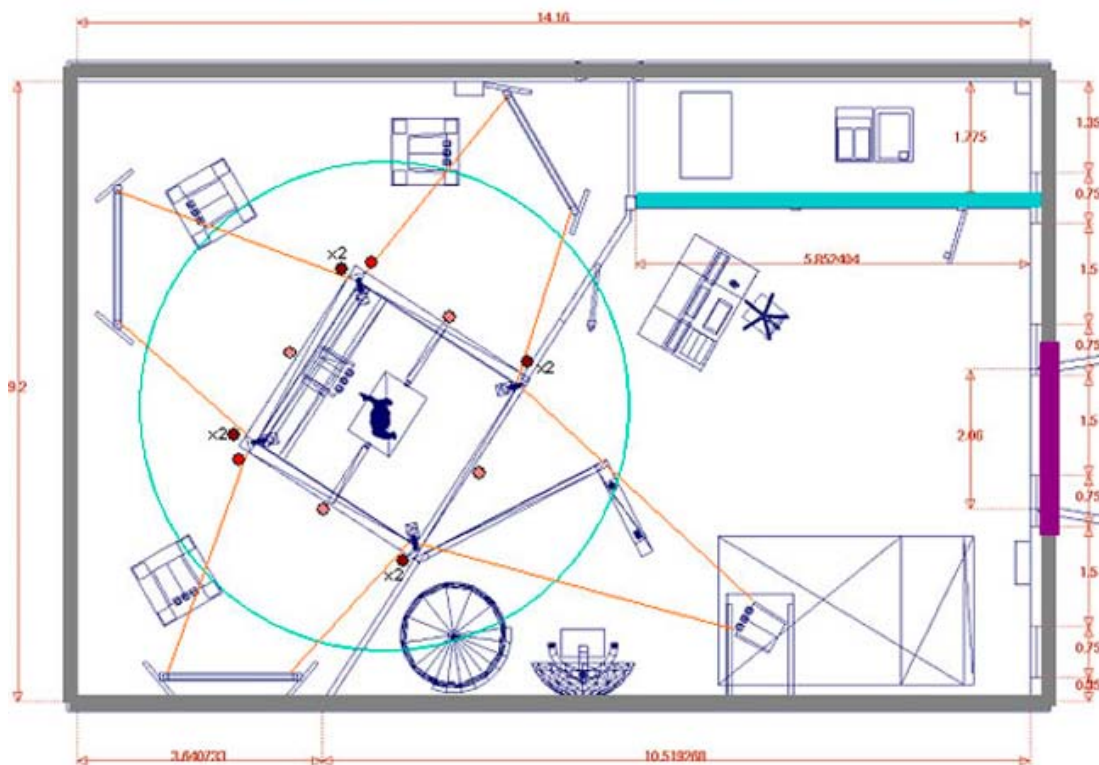



Fig. 11 - Possibile configurazione.

La ripresa viene effettuata tramite un microfono olofonico[Nota 8] il quale è formato da sette capsule localizzate esternamente sul perimetro del supporto (la testa) più una capsula interna in grado di catturare le basse frequenze, ottenendo sistemi 5.1, 6.1 o 7.1.

In uscita un Holophone ha otto cavi bilanciati organizzati come in tabella:

Canale	*Microfono*
1	Left
2	Right
3	Center
4	LFE
5	Left Surround
6	Right Surround
7	Top
8	Center Rear

Bisogna fare attenzione a distinguere un sistema surround da un sistema olofonico: un sistema surround non è in grado di far giungere all'ascoltatore i suoni provenienti da qualsiasi punto dello spazio tridimensionale, cosa che invece un sistema olofonico riesce a fare.

È da notare, tuttavia, come in commercio sia ancora difficile trovare casse acustiche in grado di riprodurre in modo fedele l'olofonia (solo ultimamente si stanno diffondendo), perciò l'ascolto si può fare quasi esclusivamente tramite l'utilizzo di cuffie.

Nota 8 - il microfono considerato è l'H2 PRO della Holophone.

2 Casi di studio

2.1 Auditorium Rai - Torino

L'Auditorium Rai (figura 12) rappresenta uno dei luoghi di riferimento di Torino per quanto riguarda la riproduzione della musica sinfonica, e non solo, grazie sia al contributo dell'Orchestra Sinfonica Nazionale della Rai, ma anche grazie alla qualità dell'ascolto che è possibile percepire all'interno della sala.

Durante la ripresa audio/video delle prove generali di un concerto di musica sinfonica, tenutasi il 13 maggio 2010 presso l'Auditorium, è stato possibile osservare la struttura interna e valutare realmente la qualità dell'ascolto. Come si può notare dall'immagine di figura 13 il palco è diviso in due parti sfasate in altezza. Nella parte inferiore è presente l'orchestra, mentre in quella superiore viene collocato, a seconda delle occasioni, il coro. Questa disposizione non è casuale, infatti, collocare nella parte superiore il coro permette di fare in modo che il suono prodotto dall'insieme degli strumenti non mascheri quello del coro. Da notare è la disposizione di una serie di diffusori in legno collocata posteriormente all'orchestra che permette di aumentare la diffusione del suono nell'ambiente senza disturbare la percezione del suono per i musicisti.

Fig. 12 - Auditorium Rai - Torino.

Fig. 13 - Ripresa senza coro.

Inoltre, sopra il palco, appesi al soffitto, sono stati posizionati sedici diffusori arcuati, disposti in due file da sei e una da quattro (figura 14). Questa disposizione ha una duplice funzione:

- dividere lo spazio tra il pavimento e il soffitto in modo da evitare l'effetto eco, che, come detto, si crea se c'è uno spazio maggiore di 17 m;
- permettere la diffusione omogenea del suono verso il pubblico posto nelle balconate e al fondo della sala.

Fig. 15 - Riflessioni centrali

Per quanto riguarda la scelta dei materiali per la progettazione acustica, sono stati utilizzati materiali in grado di favorire al massimo la diffusione, cercando di evitare, soprattutto sul palco, un alto assorbimento del suono. Per le sale da concerto è necessario ottenere una certa quantità di risonanza, che ovviamente varia a seconda del genere musicale. Sul palco sono stati, quindi scelti materiali come il legno, per il pavimento e la parete retrostante l'orchestra, e l'intonaco per i muri perimetrali dell'intero Auditorium.

Per la platea e balconate sono stati utilizzati materiali come il velluto sulle poltrone, che permette di assorbire in quantità adeguata il suono prodotto. Infatti, nella progettazione acustica e nella scelta del tipo di materiali per ambienti di questo tipo, risulta fondamentale considerare il tempo di riverberazione "a vuoto" della sala, ma anche con il pubblico all'interno, in quanto ogni persona contribuisce ad aumentare l'assorbimento acustico totale della sala.

Per valutare la qualità dell'ascolto durante la riproduzione dei brani musicali è stato utile spostarsi in due punti precisi della platea: al centro e a lato.

Come è facile prevedere, il punto in cui la qualità dell'ascolto risulta migliore è al centro, in quanto il ritardo tra l'onda diretta e le riflessioni laterali (che arrivano in contemporanea e con lo stesso valore di attenuazione) è minimo (figura 15).

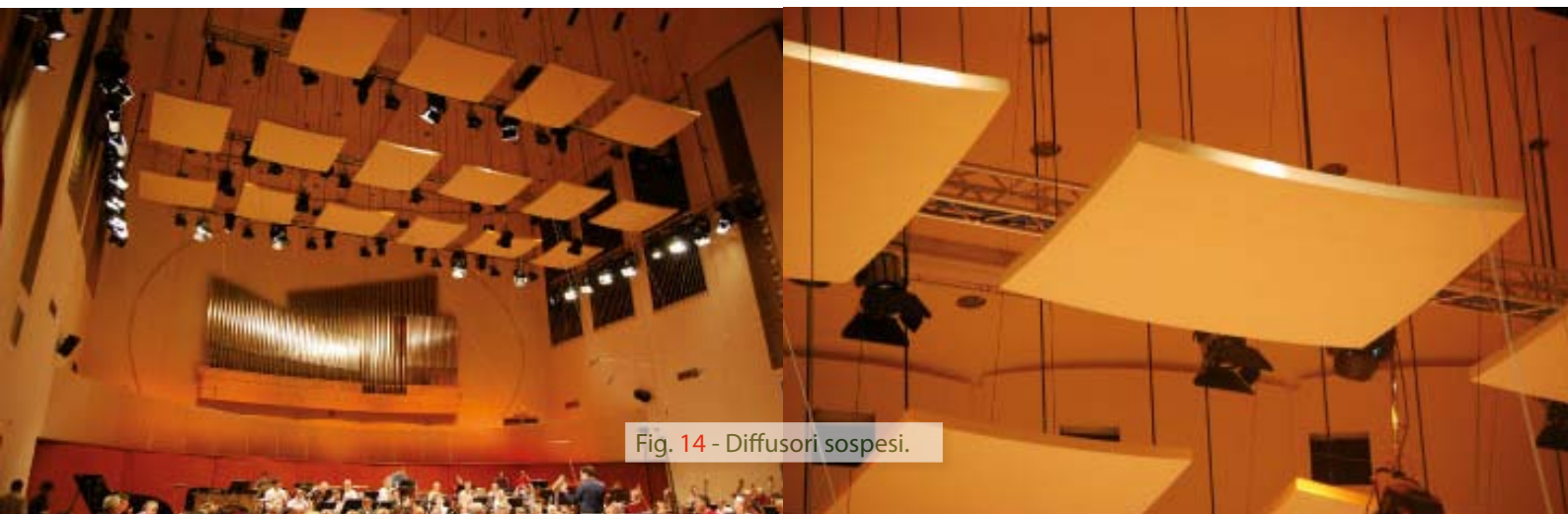



Fig. 14 - Diffusori sospesi.

Fig. 16 - Riflessioni laterali

Lateralmente, invece, la sensazione acustica varia leggermente e il suono appare più cupo. Questo fondamentalmente per il fatto che la fila laterale si trova sotto la balconata e vicino a dei pilastri; in questo modo l'energia dell'onda diretta si somma a quella dell'onda riflessa e diffratta alle basse frequenze, creando quindi un raddoppio dell'energia stessa, e provocando la sensazione di un suono più cupo (figura 16).

L'onda che viene riflessa dalla parete più lontana deve compiere un percorso nettamente più lungo di quella riflessa dalla parete opposta, oltre al fatto che viene attenuata quasi completamente prima di arrivare al punto di ascolto (soprattutto nel caso in cui la sala sia piena).

2.2 Casa della Suono – Parma

La Casa del Suono di Parma (figura 17) è un ambiente realizzato all'interno dell'ex chiesa di Santa Elisabetta con l'intento di essere sia museo, sia progetto multidisciplinare che la Casa della Musica dirige in collaborazione con l'Università di Parma. Al suo interno, oltre a contenere una collezione di strumenti di diffusione dagli anni '20 fino a oggi, offre la possibilità di effettuare delle prove di ascolto utilizzando sistemi di diffusione innovativi quali il lampadario sonoro e la sala bianca, allestita con un sistema di diffusione surround basato sulla Wave Field Synthesis (WFS)[Nota 9].

Nota 9 - tecnica che permette di creare ambienti acustici virtuali. Si producono fronti d'onda artificiali sintetizzando un certo numero di altoparlanti. A differenza di altre tecniche la localizzazione delle sorgenti virtuali non dipende dalla posizione dell'ascoltatore.

Fig. 17 - Casa del suono.

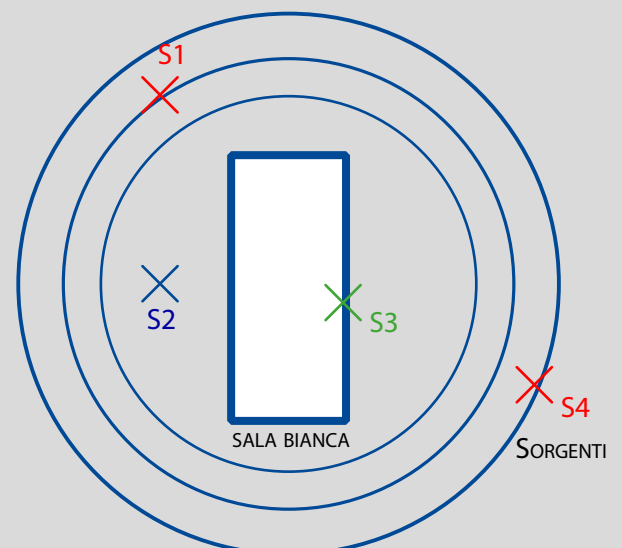
Fig. 18 - Il lampadario sonoro.

Il lampadario sonoro (figura 18) è un'installazione che permette di creare sorgenti virtuali in movimento sopra l'ascoltatore attraverso l'uso della Wave Field Synthesis, formata da 224 altoparlanti disposti in 64 gruppi alimentati da 64 canali audio. Il sistema è gestito da un elaboratore centrale che usa un software creato ad hoc, da un'interfaccia audio che consente di utilizzare 64 canali audio digitali in uscita, 8 convertitori digitale/analogico da 8 canali ciascuno e da altrettanti amplificatori a 8 canali, per un totale di 64 canali analogici finali. Camminando al di sotto del lampadario è effettivamente possibile percepire l'ampiezza del cono sonoro e discriminare le varie sorgenti, ottenendo come effetto complessivo una buona sensazione di immersione nella scena sonora. É da notare come questa sensazione sia favorita dal fatto di posizionare gli altoparlanti con un angolo di curvatura tale da fare in modo che il punto di intersezione delle onde si crei al di sopra della testa dell'ascoltatore, ponendo l'ascoltatore stesso completamente all'interno del cono sonoro.

La sala bianca, (figura 19) è un ambiente che ospita un sistema surround avanzato basato anch'esso sulla Wave Field Synthesis e gestito da un software apposito per questa applicazione. Questo sistema permette di ricreare un campo sonoro sfruttando un anello di 189 altoparlanti full-range disposti lungo il perimetro della stanza a 1.50 m di altezza.

Dagli ascolti effettuati all'interno si è potuto verificare come sia possibile ricreare una sensazione di campo tridimensionale, pur avendo sorgenti registrate in modo statico. Questa sensazione viene ricreata anche grazie alla funzionalità offerta dal software di simulare le sorgenti a diverse distanze dal punto di ascolto, che in questo caso è la sala stessa. La figura 20 corrisponde alla rappresentazione offerta dal sofware di simulazione: il rettangolo centrale è la stanza e le circonferenze simulano lo spazio di ascolto nell'ipotesi di uno spazio aperto. Le sorgenti sonore virtuali sono allocate in modo tale che movimento della sorgenti, loro intensità e distanza dall'osservatore simuli le condizioni di ascolto tridimensionale. L'effetto può essere estremamente realistico: la registrazione dell'abbaiare di un cane fermo in una posizione, ad esempio, può dare origine alla sensazione, da parte di un ascoltatore, di essere circondato da un intero branco di cani.

Fig. 19 - La sala bianca.

Fig. 20 - Gestione delle sorgenti virtuali via software.

In questo modo l'unione di elementi come la distanza delle sorgenti, il loro movimento e la loro altezza permettono di creare la sensazione di profondità del campo sonoro nell'ascoltatore.

Grazie al software è inoltre possibile simulare il riverbero tipico di diversi tipi di ambiente. Ciò è possibile registrando con dei microfoni Ambisonic le componenti di pressione e velocità tipiche di alcuni ambienti e successivamente applicandole ai vari segnali sonori. Come prova è stato ascoltato un brano di musica sinfonica a cui, in tempo reale, sono stati applicati i riverberi di una stanza di piccole dimensioni, del Teatro Farnese e di una cattedrale.

Ringraziamenti

Si ringraziano in particolare l'Ing. Angelo Farina e l'Ing. Andrea Capra dell'Università degli Studi di Parma per le informazioni fornite in occasione della visita della Casa del Suono e per la gentile disponibilità.

Bibliografia

- *L. Scopece: "*L'audio per la televisione", Roma, Gremese, 2009
- *Everest F. Alton:* "Manuale di acustica", Milano, Hoepli, 1996.
- *S. Cingolani, R. Spagnolo, Acustica musicale e architettonica, Milano, Città degli studi, 2007*
- *R. Spagnolo*: "Manuale di acustica applicata", Milano, Città degli studi, 2008.
- *V. Lombardo, A. Valle*: "Audio e multimedia", Milano, Apogeo, 2005

LeMiniSerie

Continua la pubblicazione de LeMiniSerie, raccolte di articoli apparsi nei numeri di Elettronica e Telecomunicazioni per facilitarne la lettura e consultazione su temi specifici nel campo delle telecomunicazioni.

La quarta raccolta "Acustica Architettonica e Altoparlanti" raccoglie quattro articoli pubblicati nei numeri di aprile, agosto e dicembre 2010 e aprile 2011 (ne fa parte, infatti, anche uno degli articoli pubblicati in questo numero).

L'acustica architettonica è fondamentale per la progettazione di un ambiente adatto a un particolare tipo di ascolto come, ad esempio, quello di concerti o conferenze. I tre capitoli relativi a questo tema sono dedicati rispettivamente alle basi teoriche e aspetti fisici dell'acustica, ai parametri di progetto e scelta dei materiali, all'allestimento interno degli ambienti.

Il quarto capitolo è dedicato sistemi di diffusione sonora e intende fornire le nozioni base per la scelta del tipo di diffusione più adatta al contesto in cui deve e vuole operare. Il risultato finale spesso dipende anche dalla scelta del tipo di altoparlanti e dal loro posizionamento.